



UNIVERSITÀ DI PISA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E INDUSTRIALE

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA MECCANICA

**Misure di altezza del meato  
mediante attrezzatura sperimentale  
per prove su camme e denti**

Relatori:

Prof. Ing. Enrico Ciulli  
Ing. Francesco Fazzolari

Candidato:

Alessio Lazzeretti

Sessione di laurea del 09/07/2014  
Anno Accademico 2013/2014

# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>10</b>
<b>1 Stato dell'arte</b>	<b>11</b>
1.1 Descrizione dell'attrezzatura . . . . .	11
1.2 Descrizione del gruppo di misura dinamometrico . . . . .	14
1.3 Esempi di prove svolte . . . . .	17
1.3.1 Principali problemi riscontrati . . . . .	19
<b>2 Metodo di analisi delle immagini interferometriche</b>	<b>21</b>
2.1 Principi base dell'interferometria ottica . . . . .	21
2.1.1 Interferometria mediante luce monocromatica . . . . .	22
2.1.2 Interferometria mediante luce bianca . . . . .	23
2.1.3 Interferometria mediante luce tricromatica . . . . .	24
2.2 Modelli di colore: spazi di colore RGB e HSV . . . . .	24
2.2.1 Particolarità dello spazio HSV . . . . .	25
2.3 Legame tra H e altezza del meato . . . . .	29
2.3.1 Problemi pratici . . . . .	30
2.4 Funzionamento del programma utilizzato per l'analisi delle immagini . . . . .	30
2.4.1 Principi di funzionamento dell'algoritmo di analisi delle immagini . . . . .	31
<b>3 Calibrazione delle immagini interferometriche</b>	<b>33</b>
3.1 Misura della lunghezza di un singolo pixel . . . . .	33
3.2 Calibrazione del contatto tra camma sferica e piano . . . . .	34
3.2.1 Modello teorico del contatto sfera-piano . . . . .	34
3.2.2 Calibrazione del colore . . . . .	35
3.2.3 Influenza del lubrificante nella calibrazione . . . . .	38
3.2.4 Proprietà della tavola di calibrazione . . . . .	39
3.3 Calibrazione del contatto tra camma spline e piano . . . . .	40
3.3.1 Modello teorico del contatto tra camma spline e piano . . . . .	41
3.3.2 Calibrazione del colore . . . . .	43
3.3.3 Influenza del lubrificante nella calibrazione . . . . .	44
3.3.4 Proprietà della tavola di calibrazione . . . . .	45
3.4 Confronto tra le tavole di calibrazione della camma sferica e della camma spline . . . . .	46



<b>4</b>	<b>Analisi delle immagini interferometriche</b>	<b>48</b>
4.1	Sviluppo del nuovo programma di analisi . . . . .	48
4.2	Descrizione dei settaggi per le prove svolte . . . . .	52
4.2.1	Geometria e cinematica ottenuta dai settaggi . . . . .	53
4.2.2	Proprietà del lubrificante utilizzato . . . . .	58
4.3	Misura delle forze durante le prove . . . . .	58
4.3.1	Dipendenza dell'indice di rifrazione dalla pressione . . . . .	61
4.4	Immagini interferometriche nelle posizioni significative e risultati dell'analisi	63
4.4.1	Posizionamento sul cerchio di base . . . . .	64
4.4.2	Posizionamento sul punto di inversione in salita . . . . .	73
4.4.3	Posizionamento sul punto di inversione in discesa . . . . .	76
4.4.4	Posizionamento sul punto di massima accelerazione in salita . . . . .	80
4.4.5	Posizionamento sul punto di massima accelerazione in discesa . . . . .	81
4.5	Problemi riscontrati . . . . .	81
<b>5</b>	<b>Usura e regimi di lubrificazione</b>	<b>84</b>
5.1	Valutazioni del coefficiente d'attrito . . . . .	84
5.2	Usura riscontrata sul disco in vetro dopo le prove svolte . . . . .	85
5.3	Regimi di lubrificazione riscontrati nell'analisi . . . . .	90
<b>6</b>	<b>Considerazioni finali</b>	<b>95</b>
6.1	Risultati . . . . .	95
6.2	Sviluppi futuri . . . . .	96
<b>A</b>	<b>Script di matlab</b>	<b>98</b>
A.1	Analisi delle immagini . . . . .	98
<b>B</b>	<b>Analisi degli spettri di ampiezza delle forze misurate</b>	<b>109</b>
B.1	Spettri di ampiezza delle forze misurate . . . . .	109
<b>C</b>	<b>Data-sheet della telecamera</b>	<b>114</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>117</b>

# Elenco delle figure

1.1	Schema CAD dell'attrezzatura utilizzata. . . . .	11
1.2	Schema dei gruppi principali dell'attrezzatura. . . . .	12
1.3	Sistema di precarico utilizzato in questo lavoro. . . . .	13
1.4	Gruppo dinamometrico (a) e sensori di forza piezoelettrici e loro disposizione nel dinamometro (b) . . . . .	15
1.5	Sistemi di riferimento utilizzati per lo studio della risposta delle celle di carico all'interno del dinamometro. . . . .	16
1.6	Esempio di camma utilizzata in alcune prove. . . . .	17
1.7	Forza normale in funzione dell'angolo di rotazione della camma, a diverse velocità. . . . .	18
1.8	Coefficiente d'attrito in funzione della posizione angolare della camma, per diverse velocità. . . . .	18
1.9	Esempio di immagini acquisite in presenza di usura sulla camma e graffi sul piattello. . . . .	19
1.10	Esempio di immagini acquisite in presenza di illuminazione non omogenea, con attrezzatura precedente (a) e attuale (b). . . . .	20
2.1	Principio di funzionamento dell'interferometria ottica. . . . .	21
2.2	Immagine interferometrica per un contatto EHL con luce monocromatica. . . . .	22
2.3	Immagine interferometrica per un contatto EHL con luce bianca. . . . .	23
2.4	Trasformazione tra lo spazio di colore RGB e quello HSV. . . . .	25
2.5	Confronto tra le componenti dello spazio HSV (a) e RGB (b), da [12] . . . . .	26
2.6	Confronto tra le componenti dello spazio HSV (a) e RGB (b) ottenuto con le immagini acquisite. . . . .	27
2.7	Componenti H dello spazio HSV, nel caso di contatto camma sferica-disco, con 1 N (a) e 20 N (b). . . . .	28
2.8	Rappresentazione dei difetti presenti nei pixel. . . . .	29
2.9	Esempio di Phase wrap e unwrap del valore H, da [10]. . . . .	29
2.10	Schema di funzionamento del programma utilizzato, da [10]. . . . .	31
2.11	Trasformazione di coordinate precedente al phase unwrapping, da [10]. . . . .	32
3.1	Dimensioni della griglia calibrata con diversi ingrandimenti del microscopio: ingrandimento x4.5 (a), x3 (b). . . . .	33
3.2	Deformazione della sfera e del piano, in seguito al contatto. . . . .	34
3.3	Distanza tra la sfera in acciaio di diametro 60.32 mm e il disco in vetro, per una forza di 1 N. . . . .	35

3.4	Immagini utilizzate per la calibrazione: senza olio (a), con olio SAE 5W-40 (b).	36
3.5	Risultati di PHASE UNWRAPPING con diverse soglie: 0.3 (a), 0.25 (b).	37
3.6	Tavola di calibrazione ottenuta per la camma sferica.	37
3.7	Scheda di controllo del colore del software Camware.	38
3.8	Confronto tra le curve di calibrazione delle Figura 3.4(a) e Figura 3.4(b) e in tratteggio le rette che ne approssimano l'andamento.	39
3.9	Confronto della tavola di calibrazione con diverse applicazioni del carico.	39
3.10	Confronto della tavola di calibrazione con diversi ingrandimenti.	40
3.11	Punti di riferimento tipici di una camma generica.	41
3.12	Rappresentazione grafica dei termini componenti la formula di 4.3.	42
3.13	Distanza cilindro-piano fuori dall'impronta hertziana, per un cilindro di raggio 14 mm e 20 N di forza.	42
3.14	Rappresentazione delle diverse frange dovute ai diversi raggi di curvatura.	43
3.15	Immagine della camma spline utilizzata per la calibrazione.	43
3.16	Tavola di calibrazione ottenuta per la camma spline.	44
3.17	Confronto tra la curva di calibrazione con e senza olio, e le rette che ne approssimano l'andamento.	45
3.18	Confronto della tavola di calibrazione con diverse applicazioni del carico.	45
3.19	Confronto della tavola di calibrazione con diversi ingrandimenti.	46
3.20	Confronto tra le tavole di calibrazione delle camme utilizzate.	46
3.21	Confronto tra le diverse tonalità delle frange per la camma sferica (a) e spline (b).	47
4.1	Zona parziale del contatto analizzato: 728x368 $\mu\text{m}$ .	49
4.2	Confronto tra le diverse H unwrapped con diverse soglie: 0.65 (a) e 0.5 (b).	50
4.3	Profilo 3d dell'altezza del contatto, ottenuto mediante l'analisi.	50
4.4	Curve di livello dell'altezza, ottenute mediante l'analisi.	51
4.5	Sezione del profilo di altezza, lungo l'asse y.	51
4.6	Sezione del profilo di altezza, lungo l'asse x, e confronto con il profilo teorico.	52
4.7	Sistema di riferimento utilizzato, e verso di rotazione impostato alla camma.	53
4.8	Andamento del raggio di curvatura locale e dell'entraining velocity, per la camma e la velocità di rotazione utilizzati.	54
4.9	Andamenti della posizione del centro di velocità (a) e del centro di curvatura locale (b), nel sistema di riferimento solidale alla camma.	54
4.10	Andamento dell'alzata in direzione z, in funzione della coordinata angolare.	55
4.11	Ingrandimento della zona in cui l'alzata assume legge lineare.	55
4.12	Andamenti della legge di velocità (a) e accelerazione (b) lungo l'asse z, nelle rispettive posizioni angolari.	56
4.13	Andamenti della legge di spostamento (a) e velocità (b) del punto di contatto lungo l'asse x, nelle rispettive posizioni angolari.	57
4.14	Andamento dello slide to roll ratio nelle rispettive coordinate angolari.	58
4.15	Forza normale $F_z$ , in funzione della coordinata angolare.	59
4.16	Forza d'attrito $F_x$ in funzione della coordinata angolare.	60
4.17	Momento $M_y$ , in funzione della coordinata angolare.	60
4.18	Variazione dell'indice di rifrazione con la pressione.	62

4.19	Variazione dell'errore percentuale con la pressione. . . . .	62
4.20	Variazione dell'errore percentuale con la variazione di indice di rifrazione. . .	63
4.21	Immagine utilizzata per l'analisi interferometrica del punto a $-124^\circ$ , riportata parzialmente in $294 \times 318 \mu\text{m}$ . . . . .	64
4.22	Profilo tridimensionale del meato in corrispondenza del cerchio base. . . . .	65
4.23	Sezione lungo l'asse x del profilo tridimensionale del meato, in posizione del centro. . . . .	65
4.24	Immagini utilizzate nell'analisi interferometrica dei punti a $-100^\circ$ (a) e $-79^\circ$ (b), riportate parzialmente per $294 \times 318 \mu\text{m}$ . . . . .	66
4.25	Profilo tridimensionale del meato in corrispondenza dei punti a $-100^\circ$ (a) e $-79^\circ$ (b). . . . .	66
4.26	Sezione lungo l'asse x del profilo tridimensionale del meato, in posizione del centro in corrispondenza dei punti a $-100^\circ$ (a) e $-79^\circ$ (b). . . . .	67
4.27	Immagini utilizzate per l'analisi interferometrica dei punti a $75^\circ$ (a), riportata parzialmente in $294 \times 318 \mu\text{m}$ , e $100^\circ$ (b) $350 \times 318$ . . . . .	68
4.28	Profilo tridimensionale del meato nel punto a $75^\circ$ . . . . .	68
4.29	Sezione lungo l'asse x del profilo tridimensionale del meato, in posizione del centro in corrispondenza del punto a $75^\circ$ . . . . .	69
4.30	Profilo tridimensionale del meato nel punto a $100^\circ$ . . . . .	69
4.31	Sezione lungo l'asse x del profilo tridimensionale del meato, in posizione del centro in corrispondenza del punto a $100^\circ$ . . . . .	70
4.32	Sequenza dell'inversione del moto del contatto dovuta a errori geometrici sulla camma: il contatto si muove da destra a sinistra (a), si ha l'inversione improvvisa (b),(c),(d), poi il moto torna nel verso corretto(e),(f). Dimensioni immagini: $831 \times 360 \mu\text{m}$ . . . . .	71
4.33	Sequenza dell'inversione del moto del contatto effettuata a mano: il contatto si muove da destra a sinistra, si ha l'inversione improvvisa e i raggi di curvatura crescono da (a) a (b) per poi ridurre in (c). Dimensioni immagini: $465 \times 708 \mu\text{m}$ . . . . .	72
4.34	Immagine del naso della camma. Dimensione immagine: $676 \times 1066 \mu\text{m}$ . . .	72
4.35	Immagine del punto di contatto precedente al momento di arresto della velocità in discesa (a), nel momento di arresto (b) e dopo l'arresto (c). Dimensioni immagini: $683 \times 1147 \mu\text{m}$ . . . . .	73
4.36	Profilo tridimensionale del meato in corrispondenza dei punti a $-51^\circ$ (a) e $-49^\circ$ (b). . . . .	74
4.37	Sezione lungo l'asse x del profilo tridimensionale del meato, corrispondenza del punto a $-51^\circ$ (a) e $-49^\circ$ (b). . . . .	75
4.38	Profilo tridimensionale del meato nel punto di azzeramento della velocità di entraining in salita: $-45^\circ$ . . . . .	76
4.39	Sezione nel punto di azzeramento entraining in salita : $-45^\circ$ . . . . .	76
4.40	Immagine del punto di contatto precedente al momento di arresto della propria velocità in fase di discesa (a), nel momento di arresto (b) e dopo l'arresto (c). Dimensioni immagini: $733 \times 1147 \mu\text{m}$ . . . . .	77
4.41	Profilo tridimensionale del meato in corrispondenza dei punti a $+45^\circ$ (a) e $+48^\circ$ (b). . . . .	78

4.42	Sezione lungo l'asse x del profilo tridimensionale del meato, in corrispondenza dei punti a $+45^\circ$ (a) e $+48^\circ$ (b).	79
4.43	Immagine del punto di contatto sul fianco, in fase di salita. Dimensioni immagini: $610 \times 1263 \mu\text{m}$ .	80
4.44	Immagine del punto di contatto sul fianco, in fase di discesa. Dimensioni immagini: $610 \times 1263 \mu\text{m}$ .	81
4.45	Zona del contatto con ingrandimento x3.	82
4.46	Presenza di graffi, macchie di olio, nel contatto camma-disco.	82
4.47	Problema degli errori di forma della camma: contatto su zona ampia (a), contatto localizzato (b).	83
5.1	Coefficiente d'attrito in funzione della coordinata angolare, con $R_q = 0.02 \mu\text{m}$ .	84
5.2	Coefficiente d'attrito per la camma di rugosità quadratica media $R_q = 0.5 \mu\text{m}$ .	85
5.3	Immagine relativa alla zona della camma in contatto con il disco.	86
5.4	Usura sul disco in vetro nella posizione zero: cerchio base e naso della camma.	86
5.5	Usura sul disco in vetro nella posizione $-2.5 \text{ mm}$ .	87
5.6	Usura sul disco in vetro nella posizione $-9.5 \text{ mm}$ .	87
5.7	Usura sul disco in vetro nella posizione $-14.5 \text{ mm}$ .	88
5.8	Usura sul disco in vetro nella posizione $+2.5 \text{ mm}$ .	88
5.9	Usura sul disco in vetro nella posizione $+5.5 \text{ mm}$ .	89
5.10	Usura sul disco in vetro nella posizione $+14.5 \text{ mm}$ .	89
5.11	Usura sul disco in vetro nel caso di camma con $R_q = 0.5 \mu\text{m}$ , circa $6 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ .	90
5.12	Andamenti delle altezze minime e centrali teoriche e calcolate dall'analisi.	92
5.13	Errore percentuale sul calcolo delle altezze minime e centrali teoriche e calcolate.	93
5.14	Andamenti delle altezze adimensionali minime e centrali teoriche e calcolate dall'analisi.	94
B.1	Dati acquisiti durante la fase di precarico e tutta la prova: forza normale $F_z$ (a), forza d'attrito $F_x$ (b), momento $M_y$ (c).	110
B.2	Dati delle forze durante la sola fase di movimento della camma: forza normale $F_z$ (a), forza d'attrito $F_x$ (b), momento $M_y$ (c).	111
B.3	Andamenti degli spettri di ampiezza: forza normale $F_z$ (a), forza d'attrito $F_x$ (b), momento $M_y$ (c), precedentemente al filtraggio.	112
B.4	Andamenti degli spettri di ampiezza: forza normale $F_z$ (a), forza d'attrito $F_x$ (b), momento $M_y$ (c), successivamente al filtraggio.	113

# Elenco delle tabelle

1.1	Caratteristiche principali della telecamera PCO.1200hs. . . . .	13
1.2	Dati tecnici dell'attrezzatura utilizzata. . . . .	14
3.1	Valori della lunghezza dei pixel in $\mu\text{m}$ per diversi ingrandimenti. . . . .	34
4.1	Valori delle frequenze di taglio applicate alle forze $F_x$ e $F_z$ e al momento $M_y$ . . . . .	59
4.2	Valori dei parametri caratterizzanti le posizioni di acquisizione delle immagini con il primo posizionamento. . . . .	64
4.3	Valori dei parametri caratterizzanti le posizioni di acquisizione delle immagini con il secondo posizionamento. . . . .	73
4.4	Valori dei parametri caratterizzanti le posizioni di acquisizione delle immagini con il terzo posizionamento. . . . .	77
5.1	Valori delle altezze minime, centrali e adimensionali, teoriche e sperimentali nei punti analizzati. . . . .	91

# Sommario

Questo lavoro costituisce uno studio sulla misura sperimentale dell'altezza del meato per i contatti di linea tra camma e disco (piattello). È stato sviluppato un programma di analisi di immagini interferometriche prodotte con luce bianca in grado di riprodurre il profilo tridimensionale del meato e ottenere i valori di altezza minima e centrale.

A partire da una ricerca bibliografica per ottenere il modello di calcolo della distanza tra sfera e piano e tra cilindro e piano all'esterno dell'impronta hertziana, è stato ottenuto il legame tra il colore delle frange interferometriche e la distanza tra i corpi, detto tavola di calibrazione, utilizzando una camma sferica (contatto di punto) e una camma con profilo spline senza bombatura, impiegata nelle reali applicazioni motoristiche (contatto di linea). Inoltre sono state analizzate le variazioni di questo legame con e senza olio nel contatto, con diverse forze applicate e diversi ingrandimenti del microscopio.

Sono state quindi svolte delle prove sperimentali utilizzando la camma spline, ottenendo le immagini nei punti più rilevanti del contatto e tutte le forze e i momenti scambiati con il piattello.

Le immagini ottenute sono state elaborate dal programma ottenendo i tipici profili elastoidrodinamici, prendendo anche in considerazione le variazioni dell'indice di rifrazione con la pressione nel meato. Le altezze minime e centrali ottenute sperimentalmente sono state confrontate con i corrispondenti valori teorici ottenuti mediante le formule di Hamrock. Inoltre sfruttando i valori della forza di attrito e le immagini di usura, è stata svolta un'analisi sui regimi di lubrificazione presenti durante la rotazione completa della camma.

# Abstract

This work is an experimental study for film thickness measurements in non-conformal lubricated contacts. A program for the analysis of interferometric images produced with white light has been developed. It is able to reproduce the three-dimensional profile of film thickness and to obtain the values of minimum and center film thickness. Starting from a literature review about the model to calculate the gap between a sphere and a plane and between a cylinder and a plane outside the hertzian shape, the calibration table relating the color of the interferometric fringes and the distance between the bodies has been found for a spherical and a spline cam(point contact and line contact respectively). The variation of this relationship with different force and different magnifications of the microscope has been investigated; also the effect of the presence of the oil in the contact has been detected.

Some tests have been carried out using the spline cam. The interferometric images in the most relevant points during the contact have been recorded, as well as all forces and moments components. The images obtained were processed by the program developed, getting the typical elastohydrodynamic profiles also taking into account the refractive index changes with the pressure in the film thickness. The minimum and the central heights obtained experimentally were compared with the corresponding theoretical values obtained by Hamrock's formula. Using the values of the friction force and the wear marks present in the images, an analysis about the lubrication regimes present during the motion was carried out.



# Introduzione

I tipici contatti tra camma e piattello e tra ingranaggi sono del tipo non conforme e lavorano in condizioni elastoidrodinamiche transitorie, in quanto si ha una variazione di carico, velocità e geometria durante il contatto. A causa di queste variazioni, la sola analisi numerica non è sufficiente, ma è necessario effettuare prove sperimentali in modo da validare i modelli numerici, tali prove sono complicate dal fatto di dover lavorare in condizioni transitorie, in quanto un modello stazionario, a seconda del modo di variare della velocità, tende a sottostimare o sovrastimare i valori dell'altezza del meato, per questo è essenziale un'analisi sperimentale, in quanto da sola non tiene conto di fenomeni di transitorio come lo squeeze.

In questo lavoro viene utilizzata un'attrezzatura disponibile presso il Dipartimento di ingegneria civile e industriale di Pisa, in grado di valutare contemporaneamente sia l'altezza del meato tramite interferometria ottica, sia il coefficiente d'attrito e le forze scambiate tramite celle di carico. Tale lavoro verrà svolto relativamente al contatto tra camma e piattello, utilizzando come camme dei provini sferici o di forma spline, utilizzate in reali applicazioni motoristiche.

La conoscenza dell'altezza del meato è molto importante nei contatti lubrificati perchè permette di stabilire in che regime di lubrificazione si trova il meccanismo. L'interferometria ottica è uno dei metodi più utilizzati per valutare altezza e forma del meato, per fare ciò viene utilizzata una telecamera ad alta velocità, che permette di riprendere immagini automaticamente con frequenza elevata, e la luce utilizzata viene inviata su un disco di materiale trasparente con strato semiriflettente (nello specifico in Cromo) in contatto con il provino.

L'obiettivo di questo lavoro è riuscire ad ottenere una più precisa valutazione dell'altezza del meato durante il contatto, cercando di acquisire immagini del punto di contatto con l'attrezzatura ottica, in modo da analizzare le immagini interferometriche, al fine di ottenerne il profilo del meato.

Nei capitoli successivi verrà descritta l'attrezzatura utilizzata e i problemi riscontrati in passato, successivamente verranno descritte le fasi di calibrazione del colore per le diverse camme utilizzate e in diverse condizioni, per arrivare infine alle prove di movimento effettuate, con diversi tipi di camme e con configurazioni tali da far stare fisso il piattello, verranno poi discussi i risultati ottenuti.

# Capitolo 1

## Stato dell'arte

In questo capitolo viene descritta l'attrezzatura disponibile presso il dipartimento di ingegneria civile e industriale di Pisa, utilizzata per questo lavoro, vengono illustrati i procedimenti per tarare tale attrezzatura ed alcune prove svolte nel corso degli anni. Saranno poi descritti anche i principali problemi riscontrati nelle prove.

### 1.1 Descrizione dell'attrezzatura

Nel corso degli anni l'attrezzatura utilizzata ha subito un processo di evoluzione, come descritto in [1], a partire da un'attrezzatura che misurava contemporaneamente altezza del meato e forze del contatto nel caso stazionario, è stato svolto un primo miglioramento che ha permesso di analizzare la forza di attrito del contatto in condizione di transitorio, successivamente è stata introdotta una telecamera ad alta velocità che ha permesso di riprendere in modo automatico immagini in formato digitale con una frequenza elevata, il risultato finale è l'attuale composizione che permette la misura contemporanea, in regime di transitorio, dell'altezza del meato e della forza di attrito, inoltre permette di poter variare la configurazione in modo da effettuare prove in condizioni diverse. Con riferimento a [2], lo schema costruttivo di tale attrezzatura è mostrato nella seguente Figura 1.1

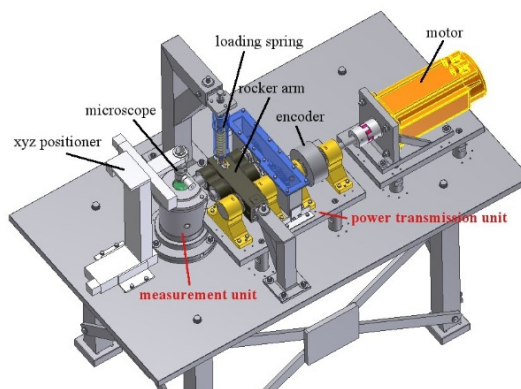


Figura 1.1: Schema CAD dell'attrezzatura utilizzata.

Tale attrezzatura è stata appositamente progettata e realizzata per lo studio di contatti tra camma e piattello e tra ingranaggi. In particolare, tale attrezzatura, nella sua configurazione base mostrata in precedenza, può essere scomposta in 5 gruppi principali, come indicato nella seguente Figura 1.2, estratta da [2]

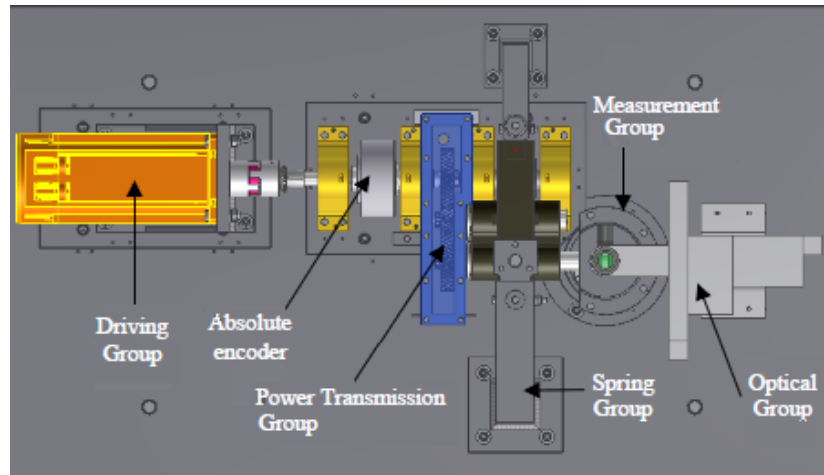


Figura 1.2: Schema dei gruppi principali dell'attrezzatura.

tali gruppi sono:

- gruppo di trasmissione potenza;
- gruppo motore;
- gruppo ottico;
- gruppo di misura dinamometrico;
- gruppo elastico;

Il gruppo di trasmissione di potenza include un braccio oscillante ( indicato nell'immagine precedente come rocker arm) all'interno del quale è installato l'albero su cui è montata la camma, la quale viene messa in rotazione da un rotismo epicicloidale attuato da un motore elettrico di tipo brushless, quest'ultimo è connesso sull'asse del fulcro del braccio oscillante, tramite un giunto elastico.

Per sapere la posizione angolare della camma in ogni istante, è stato collegato al giunto elastico un encoder assoluto in grado di misurare la posizione angolare e la velocità della camma [2], in modo da risolvere i problemi di incertezza dovuti all'utilizzo di un encoder incrementale come in [1].

Nella configurazione di Figura 1.2 il precarico viene attuato tramite una molla, generando però problemi dovuti all'attrito interno, di conseguenza in questo lavoro è stata utilizzata una leva in alluminio montata sul braccio oscillante dalla parte opposta alla molla, su tale leva vengono collegati dei pesi noti, a una distanza regolabile tramite la presenza di fori ad asola su di essa, superando i problemi della molla e permettendo una miglior regolazione

della forza di contatto, in particolare nella fase di calibrazione.  
 Il montaggio di questa configurazione è illustrato nella seguente Figura 1.3

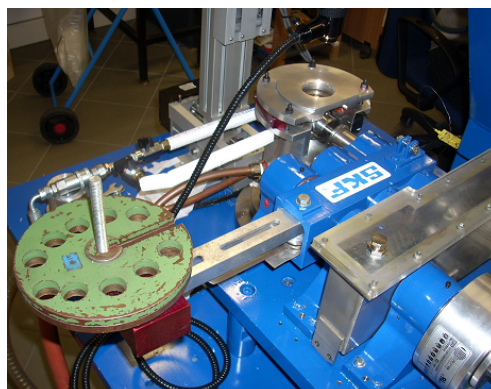


Figura 1.3: Sistema di precarico utilizzato in questo lavoro.

Il contatto tra camma e piattello, avviene nel gruppo di misura dinamometrico, che sarà meglio descritto successivamente, questa parte può assumere diverse configurazioni in quanto è possibile permettere o impedire la rotazione del piattello, e in questo lavoro verranno studiati entrambi i casi. Nelle configurazioni illustrate in precedenza il piattello è fisso ed è in materiale trasparente, in particolare è composto da un primo strato in vetro, seguito da uno strato semi-riflettente in Cr, e da un successivo strato in  $SiO_2$  a contatto con la camma, che ha il ruolo di protezione contro abrasioni e inoltre contribuisce ad aumentare il range di altezza misurabile.

Il gruppo ottico dotato della telecamera, può essere posizionato tramite un sistema cartesiano a 3 assi, controllato da computer, tramite programma in Labview, così è possibile seguire il punto di contatto. Le proprietà della telecamera sono illustrate in Tabella 1.1

Data sheet	
Sensore d'immagine	CMOS-colore
Risoluzione	1280 x 1025 pixel
Velocità	488 fps con 1280 x 1025 pixel a 66 MHz
	636 fps con 1280 x 1025 pixel a 86 MHz
	max oltre a 30000 fps con finestra minima (16 pixel)
Ram on board	4 Gb
Peso	1 Kg
File output	fotogrammi singoli: Tiff, ASCII, BMP e b16 (formato proprietario)
	filmato: non registrato direttamente ma ricostruito
B/W	1024 toni di grigio (10 bit)
Colore	16.7 milioni di colori (24 bit)
Connessione input	
Connessione output	Firewire IEEEa 1394

Tabella 1.1: Caratteristiche principali della telecamera PCO.1200hs.

La telecamera non può venire utilizzata nei casi in cui venga studiata la rotazione del piattello o l'usura di questo, in quanto nel primo caso occorre una modifica dell'attrezzatura sovrastante, mentre nel secondo sono necessari dei dischi non trasparenti.

Nella zona del contatto può essere inviato lubrificante da un sistema a bassa pressione, inoltre la sua temperatura è controllata e mantenuta costante da una termocoppia.

L'acquisizione dei dati avviene tramite una piattaforma National Instruments C-Rio, la quale permette la misura simultanea della forza del contatto e della posizione angolare della camma, con una frequenza di campionamento di 10 KHz.

Ulteriori dati tecnici relativi all'attrezzatura sono indicati nella seguente Tabella 1.2 estratta da [3]

Maximum speed (rpm)	3000
Motor power (KW)	5.65
Maximum measurable normal force (N)	6000
Maximum measurable friction force (N)	900
Maximum cam's lift (mm)	20

Tabella 1.2: Dati tecnici dell'attrezzatura utilizzata.

L'acquisizione delle immagini e delle forze avviene mediante due computer distinti, uno permette di acquisire e salvare le immagini dalla telecamera, l'altro permette di acquisire i dati del dinamometro e di movimentare la telecamera. In questo modo è possibile elaborare e salvare meglio i dati.

## 1.2 Descrizione del gruppo di misura dinamometrico

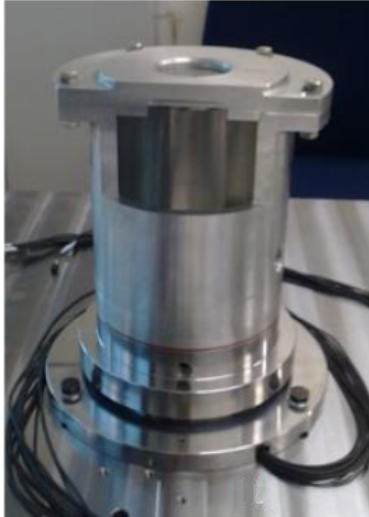
Il gruppo di misura dinamometrico è la parte più importante dell'attrezzatura utilizzata. Esso consente di stimare:

- la forza di attrito nelle sue due componenti piane;
- la forza normale alle superfici di contatto;
- i momenti agenti nelle 3 direzioni;

Il problema principale per misurare la forza del contatto nell'accoppiamento camma-piattello è rappresentato dallo spostamento, durante la rotazione della camma, della zona di contatto. Tale zona si sposta lungo un segmento ortogonale all'asse della camma con una legge che dipende dalla forma della camma stessa, quindi nota la forma della camma, e nota la sua posizione angolare, è nota istantaneamente la posizione del punto di contatto. La descrizione del dinamometro utilizzato è presente in [4] e [5]. Tale dinamometro è costituito da una base su cui sono montati 3 gruppi di 3 celle di carico piezoelettriche in acciaio martensitico, disposte a triangolo equilatero contenente il segmento su cui si sposta il punto di contatto. Ogni gruppo di celle è costituito da due celle sensibili a taglio e una a forza normale, sono disposte in modo tale da avere gli assi sensibili ortogonali tra loro e vengono precaricati tramite un prigioniero con un carico di 7000 N. Per quanto riguarda l'isolamento termico, vengono utilizzati dei cilindri in materiale ceramico (macor) e aria a

bassa pressione.

La struttura di tale dinamometro è visibile nella seguente Figura 1.4(a) in cui è anche illustrato il montaggio delle celle di carico Figura 1.4(b).



(a)



(b)

Figura 1.4: Gruppo dinamometrico (a) e sensori di forza piezoelettrici e loro disposizione nel dinamometro (b)

Le caratteristiche delle celle di carico utilizzate, della ditta Kistler, sono riportate di seguito:

- 3 celle di carico sensibili a forza normale 9133B:
  - range di misura 0-14 KN
  - sensitività -3.8 pC/N
  - precarico consigliato 50
- 3 celle di carico sensibili a forza di taglio 9143B:
  - range di misura 0-9 KN
  - sensitività -6.5 pC/N
  - precarico consigliato 7-9 KN

Un vantaggio di tali celle è la possibilità di modificare il fondo scala (valore che viene associato alla massima tensione di 10 V), rendendo possibile misurare forze di diversi ordini di grandezza con un errore ridotto, ulteriori vantaggi riguardo la modifica del fondo scala sono indicati in [4]. Le celle sono collegate ad appositi amplificatori di carica: 3 del tipo Kistler 5073A3, ognuno con 3 canali di ingresso. L'amplificatore di carica è in grado di integrare un segnale in corrente fornendo in uscita un segnale in tensione con ampiezza proporzionale alla carica posta in ingresso.

Con riferimento a [4] e [5], si indica con  $\{F\}$  il vettore contenente le tre componenti della forza di contatto e le tre componenti del momento rispetto ai tre assi del sistema di riferimento solidale al punto di contatto. I sistemi di riferimento considerati sono indicati nella seguente Figura 1.5

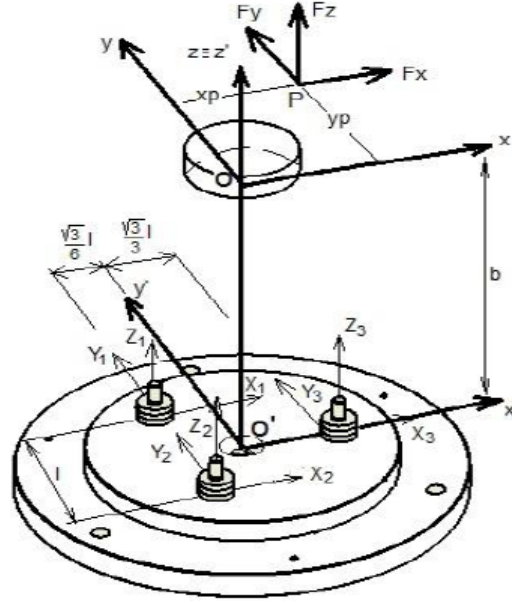


Figura 1.5: Sistemi di riferimento utilizzati per lo studio della risposta delle celle di carico all'interno del dinamometro.

in tale figura,  $X' Y' Z'$  è il sistema di coordinate adiacente al piano in cui sono posizionate le celle piezoelettriche, mentre  $X Y Z$  è il sistema di coordinate adiacente al piano sul quale giace il punto di applicazione della forza da misurare. I due sistemi di riferimento hanno l'asse  $Z$  coincidente e una distanza tra le origini costante e pari a  $b$ . Si indicano inoltre con  $X_i Y_i Z_i$ , per ogni gruppo di celle  $i$ , le forze misurate lungo i 3 assi, che vanno a formare il vettore  $\{X\}$  formato dalle 9 componenti misurate in tutto.

Dalla conoscenza della geometria, viene ottenuta la matrice geometrica con cui si lega le forze agenti sul contatto, alle forze misurate dalle celle, tale matrice è poi necessaria per la taratura dell'attrezzatura, svolta mediante l'utilizzo di pesi, da cui si riesce a ottenere il legame tra le forze agenti e i segnali in tensione provenienti dalle celle di carico.

La taratura, è stata fatta seguendo la norma UNI EN 10002/3 e utilizzando Labview per acquisire i dati, e schede National Instrument NI9239 per acquisire i segnali di tensione. I carichi sono stati applicati a step ripetuti, e le prove sono state fatte con diversi fondo scala degli amplificatori di carica, in modo da modificare l'errore percentuale commesso. Sui dati delle forze acquisiti, è necessario eliminare la deriva, che in questo caso è risultata lineare, la quale provoca la presenza di forze diverse da zero, anche in direzioni in cui non viene applicato il carico, e altera il valore delle forze. In caso di prove rapide, come quello di questo studio, l'effetto della deriva non è significativo e può quindi venire trascurato.

### 1.3 Esempi di prove svolte

Con le diverse configurazioni assunte dall'attrezzatura nel corso degli anni, sono stati svolti degli studi sul contatto tra camma e piattello, al fine di valutare le forze trasmesse, la forma e l'altezza del meato.

Esempi di questi studi e risultati ottenuti sono descritti nel dettaglio in [3], [6], [7], tramite luce bianca, e in [8] tramite luce monocromatica. In ognuno di questi studi è stata utilizzata la condizione di piattello fermo, in modo da semplificare la cinematica e il modello numerico utilizzato, inoltre in questo modo la forza d'attrito è misurabile tramite la forza resistente del piattello.

Nella maggior parte delle prove sono stati utilizzati dei provini eccentrici circolari, con eccentricità di 2 mm o di 4 mm, come quello di Figura 1.6 in cui l'eccentricità è di 4mm, in modo da avere una geometria che permetta un più semplice studio, in quanto il raggio di curvatura è sempre lo stesso.



Figura 1.6: Esempio di camma utilizzata in alcune prove.

In [7] è stato riscontrato sperimentalmente come nel passare da un regime stazionario a uno di transitorio in cui la velocità varia sinusoidalmente con frequenza crescente, i risultati ottenuti per l'altezza del meato si discostino sempre più dai valori teorici.

Gli studi prodotti in [6], sono stati fatti utilizzando dei pesi morti come precarico, oppure una molla di rigidezza nota, ed effettuando prove a diverse velocità, in modo da vedere l'influenza degli effetti dinamici sulla forza normale. È stato possibile notare come l'utilizzo della molla limiti la variazione della forza normale all'aumentare della velocità.

Nell'attrezzatura utilizzata in [6] però non era presente un sensore di posizione angolare della camma, quindi non è stato possibile sfruttare una corrispondenza tra posizione angolare e valore del coefficiente di attrito. Questo problema è stato superato con l'ultima versione dell'attrezzatura ([2]), utilizzata per le prove di [7], in cui sono emersi problemi legati alla rugosità e a lappatura incompleta dei provini, inoltre i dati ottenuti sono stati soggetti a filtraggi per rimuovere i disturbi dovuti a errori di ingranamento (legati ai denti delle ruote dentate, che sono in numero pari) e problemi dovuti al precarico con la molla, comunque i risultati ottenuti sperimentalmente sono molto vicini ai valori calcolati con formule numeriche Figura 1.7



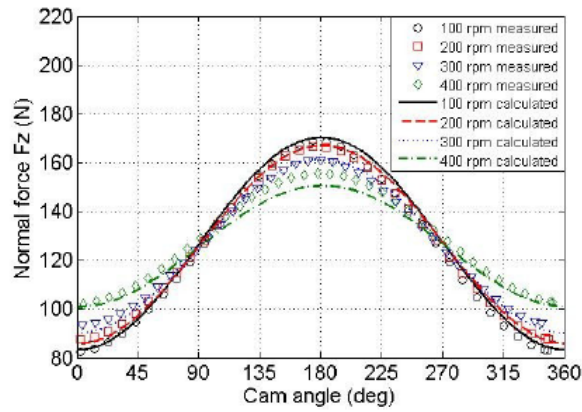


Figura 1.7: Forza normale in funzione dell'angolo di rotazione della camma, a diverse velocità.

Sempre in [7] sono stati calcolati i coefficienti d'attrito per diverse velocità di rotazione, come rapporto tra la forza d'attrito lungo l'asse X e la forza normale lungo Z, è stato possibile notare un decremento di questo con l'aumentare della velocità e un valore di massimo nel punto di prima inversione del moto del punto di contatto Figura 1.8

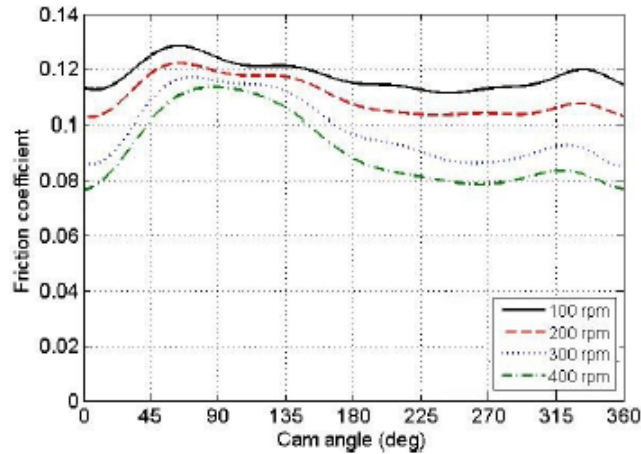


Figura 1.8: Coefficiente d'attrito in funzione della posizione angolare della camma, per diverse velocità.

Prevalentemente il valore di attrito indica una lubrificazione limite, diventa mista per le velocità maggiori. Tali prove però sono state fatte sfruttando provini di diversa rugosità ed eccentricità, e un valore maggiore di quest'ultima permette un maggior regime di lubrificazione mista. Su tali studi è stata riscontrata l'influenza della variazione dell'indice di rifrazione del lubrificante con la pressione, sul calcolo dell'altezza del meato, tale dipendenza è stata studiata in [8] in cui l'attrezzatura è stata utilizzata per prove con luce monocromatica, su contatti tra una sfera d'acciaio e disco di vetro, sfruttando trasformate

di Fourier.

Il programma utilizzato per determinare la mappa del contatto tra camma e piattello in caso di luce bianca, descritto in [9] e [10], è basato sull'analisi del canale del colore nello spazio dei colori HSV ([12]). Tale programma richiede una prima fase di calibrazione dei colori tramite confronto con contatto hertziano noto ottenendo una tabella, e una successiva fase di analisi degli interferogrammi tramite la precedente tabella calibrata, il risultato finale è una diretta correlazione tra altezza meato e informazioni sul colore, sfruttando inoltre un sistema di filtraggio dati per mezzo di software Matlab. Questo programma ha permesso un'analisi semplice e veloce di molte immagini insieme sia in condizioni di transitorio che di regime, ha però dei limiti sull'altezza del meato calcolabile, per migliorare richiede luce tricromatica, ed è stato necessario sfruttare la conoscenza del legame tra indice di rifrazione e pressione per ridurre gli errori di valutazione. Ulteriori errori di questo sistema sono dovuti a problemi legati all'illuminazione non uniforme, che provoca alterazioni di colore e anche dovuti all'insorgere di cavitazione nel contatto. In questi studi comunque non è stata fatta un'analisi dettagliata del calcolo dell'altezza del meato tramite interferometria, cosa che sarà oggetto del presente lavoro.

### 1.3.1 Principali problemi riscontrati

Come visto dalle prove passate, i principali problemi sull'acquisizione delle immagini sono dovuti ai disturbi del segnale e ai rumori di fondo, che richiedono un sistema di filtraggio per poter elaborare i dati. Il disturbo sul segnale aumenta all'aumentare della velocità della camma, ed è dovuto prevalentemente alla trasmissione di potenza tramite rotismo epicicloidale. In particolare nelle ultime prove svolte con l'attuale attrezzatura ([3]), si sono riscontrati problemi dovuti all'usura della camma e del piattello che hanno alterato le immagini, come in Figura 1.9.

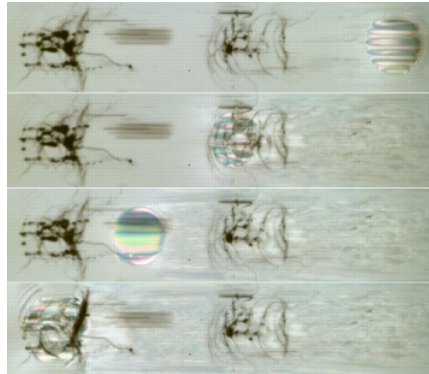


Figura 1.9: Esempio di immagini acquisite in presenza di usura sulla camma e graffi sul piattello.

I graffi sul piattello sono dovuti anche all'eccessivo precarico dovuto all'uso delle molle, le quali inoltre alterano i dati a causa di attriti interni.

Un altro tipo di problemi sul processo di interferometria, presente soprattutto in passato, è dovuto all'illuminazione non uniforme, che altera la valutazione del colore dell'immagine. Per questo problema sono stati fatti miglioramenti rispetto all'attrezzatura precedente, per

la quale il problema dell'illuminazione è riportato in Figura 1.10(a), mentre un esempio per l'attrezzatura attuale è in Figura 1.10(b), in cui il problema persiste ma in modo molto minore.

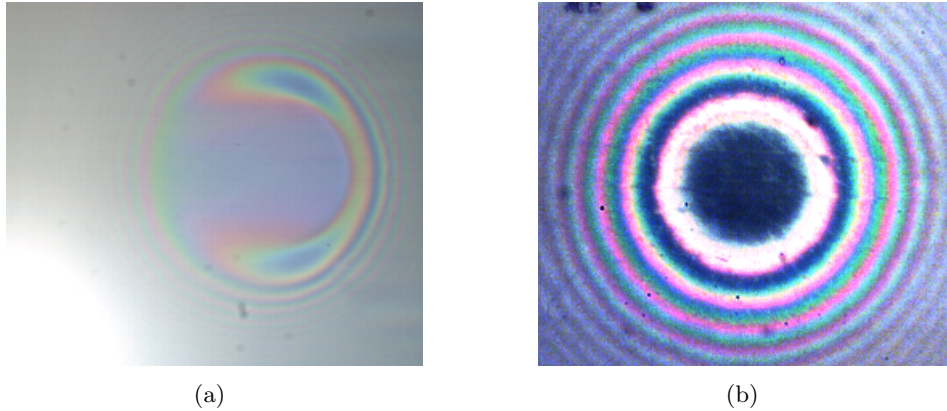


Figura 1.10: Esempio di immagini acquisite in presenza di illuminazione non omogenea, con attrezzatura precedente (a) e attuale (b).

L'utilizzo di provini circolari con superfici sferiche, come camme, ha come vantaggi un limitato effetto di transitorio, una più semplice cinematica e dinamica e non ha problemi dovuti all'allineamento, tipico di camme reali con superfici cilindriche, però ha anche degli svantaggi, come una maggior pressione hertziana e una maggior usura localizzata, inoltre problemi dovuti a errori di circolarità e rugosità fanno sì che l'impronta del contatto non sia esattamente circolare.

Un ulteriore problema riscontrato negli studi passati è l'ingrandimento dell'area del contatto per mettere a fuoco la zona in cui si muove il punto di contatto, tenendo ferma la telecamera.

In questo lavoro si cercherà di superare questo problema sfruttando un programma in LABVIEW per permettere alla telecamera di seguire il punto di contatto, garantendo un maggior ingrandimento del punto di contatto in modo da avere una migliore visualizzazione.

## Capitolo 2

# Metodo di analisi delle immagini interferometriche

In questo capitolo viene descritto il procedimento per elaborare qualitativamente e quantitativamente le immagini interferometriche mediante luce bianca, per ottenere altezza e forma del meato nella zona in contatto. Dopo una fase di calibratura, vengono descritte le prove svolte.

### 2.1 Principi base dell'interferometria ottica

L'interferometria ottica è un metodo molto diffuso per analizzare l'altezza del meato nella zona in contatto, ed è efficace anche in condizioni di transitorio. Per sfruttare l'interferometria è necessario che la zona in contatto sia visibile, perciò occorre che uno dei due corpi in contatto sia in materiale trasparente. Nella pratica gli elementi in contatto di una coppia meccanica non rispettano questa condizione, quindi vengono svolte delle simulazioni mettendo in contatto un provino metallico con una certa curvatura e un disco in vetro ottico. Il principio di funzionamento di questo modello è illustrato in Figura 2.1

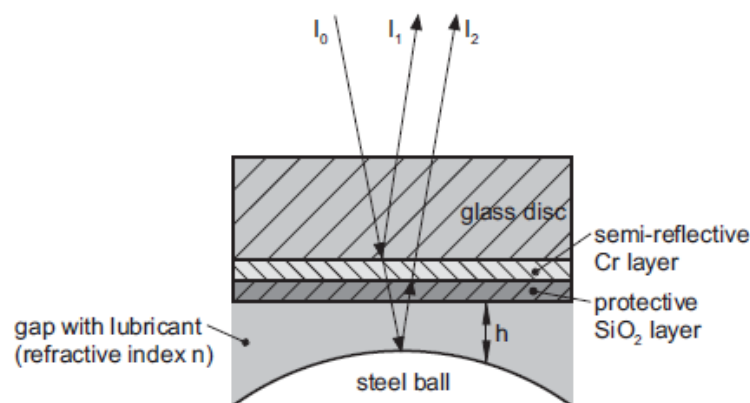


Figura 2.1: Principio di funzionamento dell'interferometria ottica.

il disco in vetro utilizzato è rivestito con uno strato semi riflettente in Cromo, sul lato del contatto.

La luce viene inviata attraverso il vetro e una parte viene riflessa dalla superficie tra vetro e lo strato di cromo, mentre un'altra parte della luce prosegue ed è riflessa dalla superficie del provino. L'angolo formato tra superficie trasmessa e riflessa è molto piccolo. Nella precedente Figura 2.1 compare anche uno strato in biossido di silicio ( $SiO_2$ ), il quale serve come protezione per ridurre l'usura e anche come spessore per aumentare il range di misura.

Dopo che i due raggi riflessi hanno percorso diverse distanze, avranno una differenza di fase tra le due lunghezze d'onda, di conseguenza l'ampiezza risultante è tra 0 e due volte il valore iniziale, in base al ritardo. Il risultato di questa interferenza sono le frange che caratterizzano le immagini interferometriche, tali frange sono chiare e scure se viene utilizzata luce monocromatica, sono invece di diversi colori se viene utilizzata luce bianca.

### 2.1.1 Interferometria mediante luce monocromatica

La luce monocromatica è caratterizzata da uno spettro molto stretto intorno a una lunghezza d'onda  $\lambda_0$  da cui dipende il calcolo dell'altezza del meato.

Con questo tipo di luce l'altezza del meato tra disco e provino, può essere calcolata in base al numero di frange chiare e scure dell'immagine interferometrica, come ad esempio nella seguente Figura 2.2 in cui la luce ha  $\lambda_0 = 545nm$

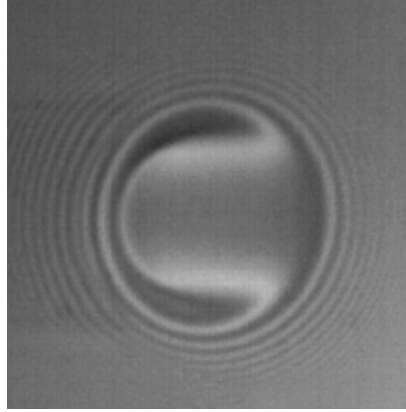


Figura 2.2: Immagine interferometrica per un contatto EHL con luce monocromatica.

Il legame tra l'altezza del meato e l'intensità di interferenza dipende dall'indice di rifrazione  $n$  e dallo spessore  $h_i$  del mezzo interposto, ma anche dal cambio di fase  $\Phi$  dovuto alla riflessione. Un'approssimazione dell'irradianza  $I$  di un raggio prodotto dall'interferenza dei due raggi riflessi, estratta da [5], con  $I_1$  e  $I_2$  visti nella Figura 2.1 è la seguente 2.3

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 + I_2} \cdot e^{-C_a h^2} \cdot \cos\left(\frac{4\pi h_{opt}}{\lambda_0} + \Phi\right) \quad (2.1)$$

in cui  $h_{opt}$  è dato da

$$h_{opt} = n_{aria} \cdot h_{aria} + n_{stratodisco} \cdot h_{stratodisco} \quad (2.2)$$

dove con  $n_{aria}$  e  $n_{stratodisco}$  si indica gli indici di rifrazione dell'aria ( o dell'olio, se immerso) e del disco, con  $h_{aria}$  e  $h_{stratodisco}$  si indica le altezze percorse le punto in cui la luce viene inviata. Il termine  $C_a$  invece è il fattore di perdita di irradianza dovuto all'aumentare dell'altezza del meato a causa della luce non perfettamente coerente.

La luce monocromatica presenta alcuni svantaggi:

- contando il numero di frange si ha solo una variazione discreta di altezza, mentre il valore assoluto dell'altezza deve essere già noto in almeno un punto, inoltre non indica in maniera univoca se la variazione tra due altezza successive è positiva o negativa;
- per poter valutare l'altezza richiede lunghe e numerose operazioni da parte di un utente competente, oppure complessi algoritmi per processare le immagini;
- la risoluzione è limitata, è possibile valutare solo altezze discrete agli estremi delle frange, mentre per i valori intermedi occorre interpolare. Il valore di questi intervalli discreti è dell'ordine di  $\Delta h = \lambda_0/4n$  e in generale  $n = 1.5$  e  $\lambda_0 = 545\text{nm}$  perciò si ha  $\Delta h = 91\text{nm}$  ;
- ulteriore problema è il modo in cui illuminare l'area in contatto, in quanto occorre filtrare la luce bianca e di conseguenza si hanno perdite di intensità, per cui ogni immagine richiede molto tempo di esposizione rispetto alla luce bianca diretta, tutto ciò è ammissibile solo in condizioni stazionarie mentre il transitorio permette solo pochi ms di tempo di esposizione ;

### 2.1.2 Interferometria mediante luce bianca

L'utilizzo della luce bianca risolve alcuni problemi della monocromatica. L'immagine interferometrica ottenuta è caratterizzata da frange colorate, facili da distinguere, come in Figura 2.3.

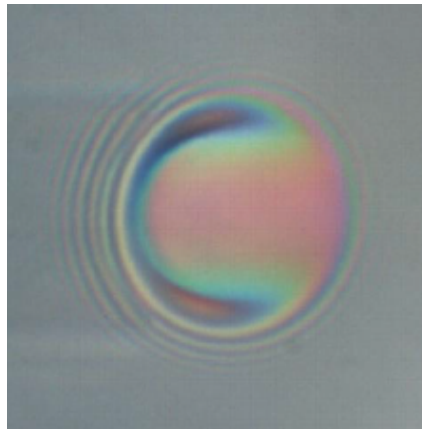


Figura 2.3: Immagine interferometrica per un contatto EHL con luce bianca.

Ogni frangia colorata corrisponde a una precisa altezza del meato. Tali frange sono fatte da raggi con diverse lunghezze d'onda, da cui dipende l'indice di rifrazione  $n$ , perciò il

modello matematico del fenomeno è più complesso del caso con luce monocromatica.

Il legame tra l'altezza del meato e i valori numerici dei colori delle frange è in genere non lineare, quindi per determinare l'altezza occorre ottenere prima una tavola di calibrazione. La luce bianca permette una maggior risoluzione ma è limitata dall'accuratezza con cui i colori possono essere distinti, comunque si arriva a risoluzioni di 3 nm. Colori molto simili si ripetono nel range di misura, perciò se la valutazione viene fatta da un utente, è richiesta molta esperienza e molto tempo, perchè la percezione varia da individuo a individuo, quindi occorre utilizzare degli algoritmi automatici complessi.

La luce bianca ha tuttavia anche alcuni svantaggi, tra cui:

- limiti sul range di misura. Altezze minori di  $0.1 \mu\text{m}$  diventano ombre grigie, vicine al nero (che è lo zero);
- in caso di altezza intorno a  $1 \mu\text{m}$  le frange diventano poco visibili a causa della bassa coerenza della luce bianca, mentre la luce monocromatica arriva ad altezze di alcuni  $\mu\text{m}$  ;

con la luce bianca è possibile ridurre il limite inferiore utilizzando lo strato in  $\text{SiO}_2$  sul disco, riducendo però anche il limite superiore. In ogni caso il range di misura rimane stretto, ma dell'ordine di grandezza tipico delle altezze del meato di comuni contatti EHL, perciò è accettabile se le prove sono ben fatte.

### 2.1.3 Interferometria mediante luce tricromatica

Vengono utilizzati tre raggi monocromatici con tre diverse lunghezze d'onda, l'immagine ottenuta è a colori, e rispetto alla luce bianca vengono ridotte le perdite di saturazione dovute a interferenze multiple che danno zone grigie.

È molto complicato però filtrare questa luce.

## 2.2 Modelli di colore: spazi di colore RGB e HSV

Esistono diversi metodi per descrivere le informazioni dei colori sia quantitativamente che qualitativamente, in modo da poter effettuare analisi sul computer. Il metodo più comune è lo spazio RGB, il quale rappresenta ogni colore con componenti di rosso, verde e blu, evitando inutili conversioni tra colori diversi. La sua rappresentazione su uno spazio cartesiano è un cubo in cui le coordinate RGB sono equidistanti dallo zero (nero) e variano da 0 a 255, valore massimo definito in caso di immagini a 8 bit.

Un altro spazio di colori, simile alla percezione ottica umana, è lo spazio HSV, il quale indica sia un metodo additivo di composizione di colori che un modo per rappresentarli in un sistema digitale. Tale spazio definisce i colori attraverso luminosità (V), tonalità (H) e saturazione (S):

- H è la tonalità del colore, è la componente che dà le informazioni sul colore così come usato nel linguaggio comune;
- S quantifica l'intensità e la purezza della singola tonalità del colore;
- V indica la luminosità e corrisponde alla brillantezza del colore ;

RGB e HSV sono convertibili dall'uno all'altro tramite una funzione bigettiva e non lineare, che produce il cambiamento della forma dello spazio del colore come in Figura 2.4.

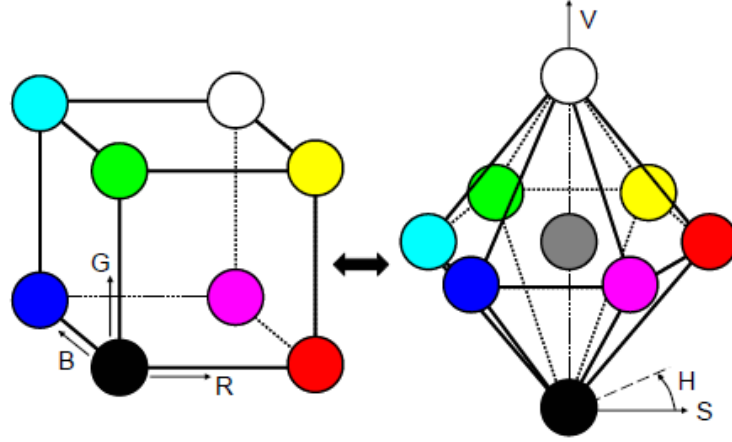


Figura 2.4: Trasformazione tra lo spazio di colore RGB e quello HSV.

Il legame tra la componente H e le componenti RGB è dato dalla seguente relazione secondo [9]

$$H = \arctan 2\left(\frac{2G - R - B}{R - B}\right) \quad (2.3)$$

dove  $\arctan 2$  è la funzione inversa della funzione tangente, univoca e di dominio  $(-\pi; \pi)$ . Questa relazione però risulta avere delle differenze rispetto alla conversione da RGB a HSV eseguita dal software Matlab, la cui conversione può essere meglio simulata con la formula di [11], come verificato in questo lavoro.

$$H = \begin{cases} \theta & \text{se } B \leq G \\ 2 \cdot \pi - \theta & \text{se } B > G \end{cases} \quad (2.4)$$

con

$$\theta = \arccos \frac{0.5 \cdot (2 \cdot R - G - B)}{((R - G)^2 + (R - B) \cdot (G - B))^{0.5}} \quad (2.5)$$

Il valore massimo e minimo di H è dato arbitrariamente in modo che il rosso compaia a zero e a  $2\pi$ . In questo lavoro le componenti di HSV vengono normalizzate tra 0 e 1.

### 2.2.1 Particolarità dello spazio HSV

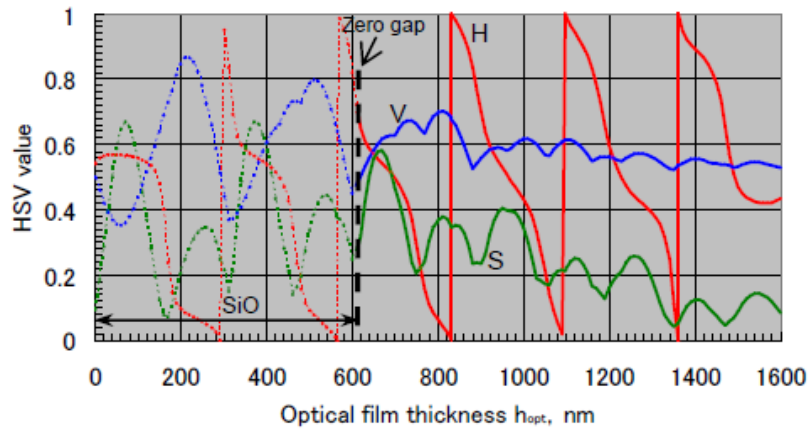
Nelle immagini interferometriche, le frange presentano delle ripetizioni di stesso colore nella zona dell'area del contatto, quindi la successione del colore sulla superficie di contatto è una funzione quasi periodica, ma non lo è perfettamente ([10] e [12]). L'andamento del colore H ha un andamento quasi periodico caratterizzato da una fase di  $2\pi$ , dopo cui salta dal valore minimo al massimo, e viceversa, ogni volta che si supera tale intervallo. Per superare questa ambiguità sul valore di H, occorre elaborare prima una tavola di calibrazione che legghi direttamente il valore di H all'altezza del meato. Gli andamenti delle



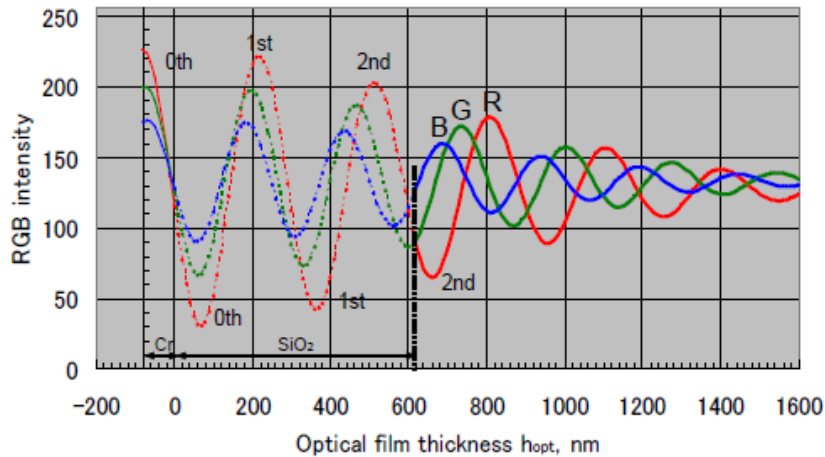
altre due componenti S e V, sono caratterizzati da variazioni molto irregolari, perciò la loro analisi non è utile per il calcolo dell'altezza del meato.

L'uso della sola componente H (colore) è giustificato da una più semplice calibrazione, e anche dalla sua insensibilità alla luminosità e alla saturazione del colore, che sono propri delle altre due componenti. In questo modo i risultati vengono svincolati dalle condizioni di illuminazione, e l'analisi delle immagini viene legata a una sola componente, semplificando calibrazione e analisi.

Il valore di H potrebbe essere ricavato tramite conversione dallo spazio RGB ([12]), quest'ultimo spazio potrebbe essere utilizzato per analizzare le immagini ([13]), ma darebbe dei problemi in quanto le sue tre componenti hanno andamenti quasi sinusoidali come H, con diverse fase e frequenza, ma è più problematico ottenere una calibrazione affidabile perchè occorre lavorare con tre componenti ambigue invece di una sola (H). Il confronto tra le componenti dei due spazi è mostrato nelle successive Figura 2.5(a) e Figura 2.5(b).



(a)



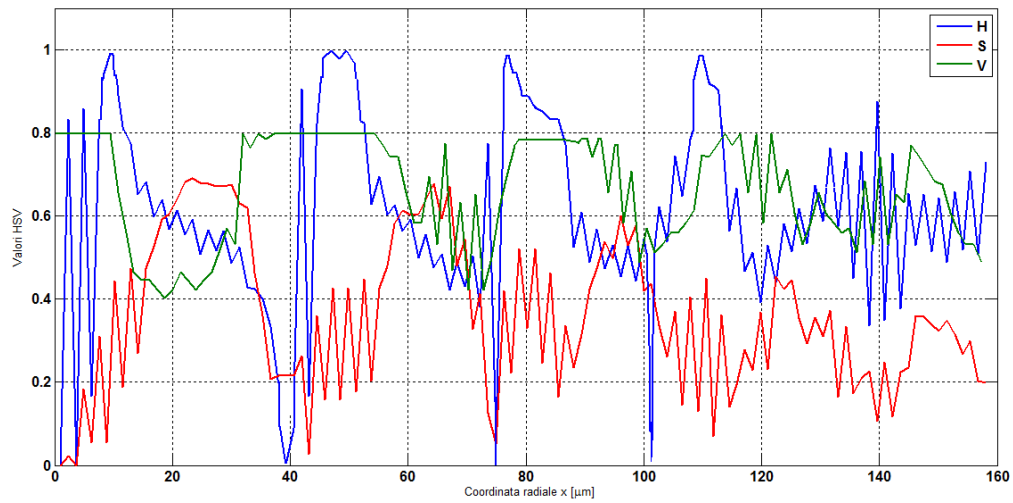
(b)

Figura 2.5: Confronto tra le componenti dello spazio HSV (a) e RGB (b), da [12]

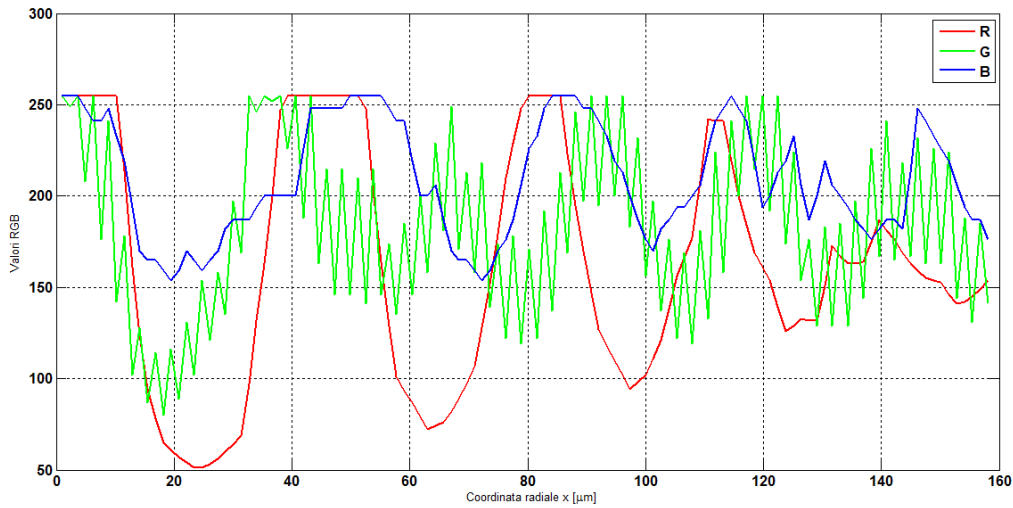
Con lo spazio RGB inoltre si hanno delle zone con colori diversi su altezze di uguale valore, a causa della forte sensibilità all'illuminazione. L'attrezzatura utilizzata non garantisce un'illuminazione uniforme, perciò lo spazio RGB in questo caso, non è adatto, ma viene preferito svolgere l'analisi delle attraverso lo spazio HSV, in particolare con la sola componente H.

Con le immagini in esame, si ottiene in teoria l'andamento delle componenti HSV Figura 2.6(a) e RGB e Figura 2.6(b), in funzione delle altezze del contatto considerando anche lo spessore del disco in vetro, a partire dal centro del contatto hertziano.

Da tale figura cui si nota l'andamento caratteristico della componente H, molto simile al caso precedente, confermandone i vantaggi.



(a)

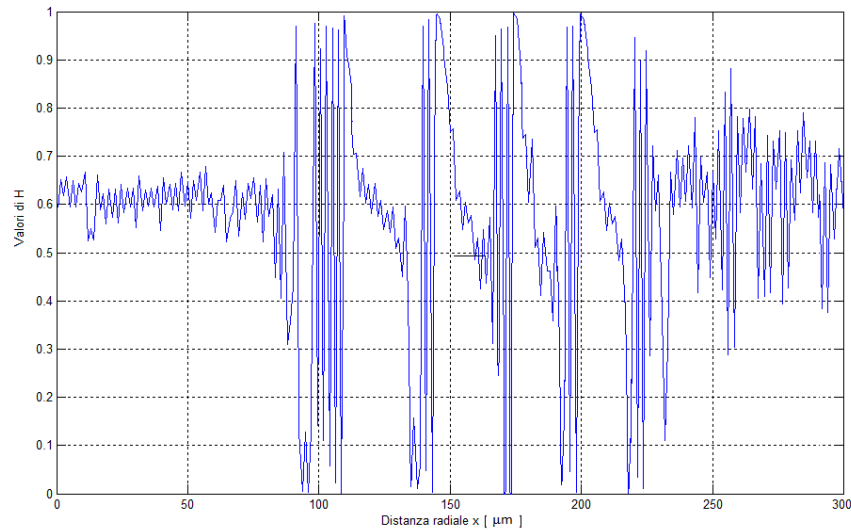


(b)

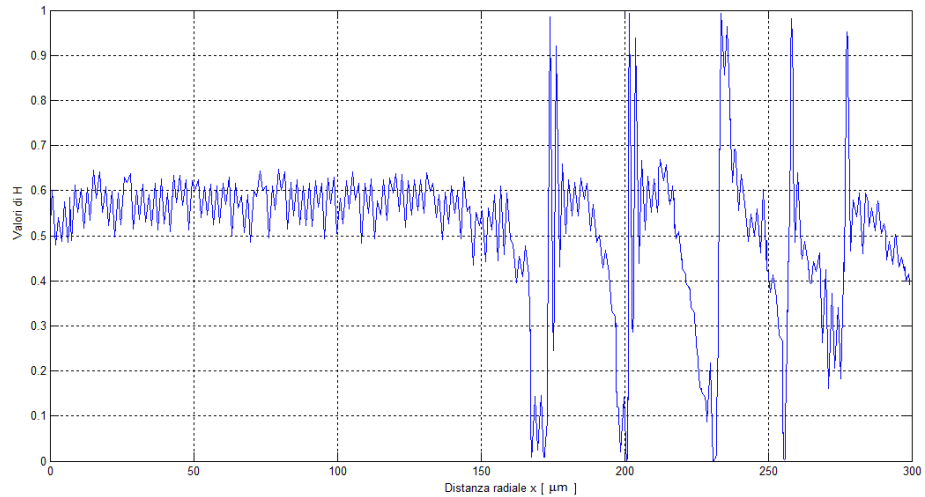
Figura 2.6: Confronto tra le componenti dello spazio HSV (a) e RGB (b) ottenuto con le immagini acquisite.

Le precedenti immagini delle componenti del colore nei due spazi analizzate, sono relative al contatto tra la camma spline, descritta successivamente, e il disco in vetro, nel caso di forza normale applicata pari a 1 N, nel caso quindi che il contatto sia di linea, di conseguenza, la zona relativa all'impronta hertziana risulta limitata a circa  $7 \mu m$ .

Per osservare come la componente del colore H, vari in seguito alle diverse dimensioni dell'impronta hertziana, vengono riportate di seguito le figure relative all'andamento di H nel caso di 1 N (Figura 2.7(a)) e 20 N (Figura 2.7(b)) per la camma sferica di raggio 30 mm, in cui quindi il contatto risulti di punto e di conseguenza l'impronta hertziana maggiore, e in particolare è possibile fare il confronto con la precedent figura relativa alla camma spline con 1 N.



(a)



(b)

Figura 2.7: Componenti H dello spazio HSV, nel caso di contatto camma sferica-disco, con 1 N (a) e 20 N (b).

Le oscillazioni presenti sull'andamento di  $H$ , rispetto a quello teorico e filtrato della Figura 2.5(a), sono dovute ai disturbi elettrici presenti nel sistema di acquisizione immagini, e in particolare dovuti alla conversione del file dal formato della telecamera al formato del computer, che provoca errori nei pixel come in Figura 2.8, inoltre sono dovute anche a problemi di illuminazione da parte dell'attrezzatura ottica,.

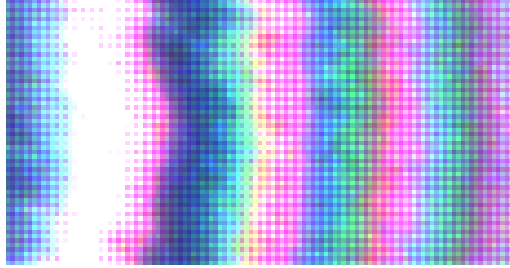


Figura 2.8: Rappresentazione dei difetti presenti nei pixel.

La presenza di pixel alterati da disturbi elettrici, causa di conseguenza le strane oscillazioni delle componenti RGB, che si ripercuotono su  $H$  ma anche su  $S$  e  $V$ , legate da formule simili a quella di  $H$  allo spazio RGB.

### 2.3 Legame tra $H$ e altezza del meato

In questo lavoro sono descritti solo gli aspetti principali del legame tra la componente del colore  $H$  e l'altezza del meato, in modo da indicare il processo di funzionamento utilizzato nel programma per elaborare le immagini interferometriche e ottenere in uscita le misure desiderate.

Per maggiori dettagli sugli aspetti matematici si rimanda a [10].

Il valore di  $H$  viene normalizzato tra 0 e 1, in modo da diventare una funzione quasi periodica con un cambiamento di fase come quello di Figura 2.9, presa da [10].

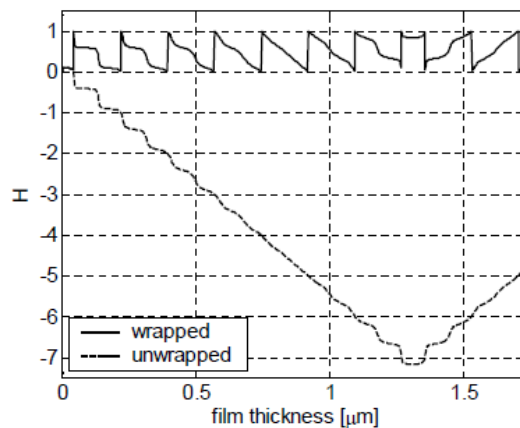


Figura 2.9: Esempio di Phase wrap e unwrap del valore  $H$ , da [10].

Questa immagine è ricavata dal modulo di una funzione senza limiti. Si nota una discontinuità ogni volta che viene superato l'intervallo di  $2\pi$ , quindi ogni angolo con valori maggiori di  $2\pi$  o minori di 0, viene associato al valore assunto dal corrispondente punto dell'intervallo precedente. Il valore di  $H$  nelle immagini con frange colorate che si ripetono, è una funzione di questo tipo in due dimensioni, e viene chiamata wrapped  $H_W$ . Fondamentalmente il processo di phase wrapping è reversibile aggiungendo o sottraendo un valore a tutti i punti conseguenti alla discontinuità, in modo da ricostruire un segnale continuo detto phase unwrapping  $H_U$ , questo metodo può essere eseguito calcolando le derivate sui picchi delle discontinuità e ponendole uguali a zero. dopo di che vengono ricalcolati gli integrali.

Nella figura precedente, si nota il comportamento tipico di  $H$  unwrapped in funzione dell'altezza del meato:  $H$  decresce in maniera monotona fino a un minimo la cui posizione dipende dallo spettro di luce, per luce tricromatica tale minimo è intorno a  $1\mu\text{m}$ , invece per luce bianca è intorno a  $0.6\text{-}0.8\mu\text{m}$ .

Appena è disponibile  $H$  come funzione monotona nell'intervallo, è possibile ricavare la tavola calibrata che lega  $H$  all'altezza del contatto in maniera univoca. L'aumento monotono dopo il minimo è relativo a calibrazioni differenti e a causa di visibilità non soddisfacente per queste altezze, viene utilizzata soltanto la parte monotona decrescente.

### 2.3.1 Problemi pratici

Le misure possibili, sono affette da disturbi e inoltre se il campionamento è lento, la dinamica della discontinuità può non essere del tutto riscontrata, di conseguenza il salto non sarà esattamente 1 ma poco meno. Quando l'altezza del contatto diventa grande, le frange si attenuano e la discontinuità si perde. A causa dei disturbi sul segnale, è necessario distinguere quali discontinuità sono dovute a salti di fase, e quali a errori sul segnale, occorre utilizzare un filtro per evidenziare i salti di fase, che avvengono ad alta frequenza. Un ulteriore problema è dovuto all'integrazione di  $H_W$ , in quanto dipende dal percorso seguito e provoca propagazione di errori in modo che è difficile avere  $H_U$  corretto ovunque. Sono stati sviluppati molti algoritmi per ottenere un profilo più continuo possibile, permettendo un phase unwrapping multidimensionale, come in [15], in modo da ridurre gli errori.

## 2.4 Funzionamento del programma utilizzato per l'analisi delle immagini

Il programma per elaborare le immagini, lavora in due step:

1. nella prima parte viene effettuata la calibrazione, cioè si cerca il legame tra la componente di colore  $H$  e l'altezza del meato, ottenendo una tavola di calibrazione, per ogni tipo di contatto studiato;
2. nella seconda parte viene svolta l'analisi delle immagini sfruttando la tavola di calibrazione precedente;

in entrambi i casi è necessario effettuare il phase unwrapping, utilizzando lo stesso algoritmo nel sottoprogramma di ogni step. I due sottoprogrammi analizzano le immagini in

modo diverso perchè nella calibrazione si guarda soprattutto l'area al di fuori del contatto mentre nell'analisi vera si studia solo l'area in contatto.

La calibrazione viene svolta sfruttando un contatto Hertziano con altezza dell'impronta nota in funzione della coordinata radiale, ricorrendo a un modello di [16] implementato su Mathcad, dall'immagine ottengo una matrice di due righe: una riga ha i valori di  $H$  dopo il processo di unwrapping, l'altra riga ha i valori dell'altezza dell'impronta. Per effettuare questa analisi occorre fornire come input l'area del contatto e l'immagine da usare, noto il fattore di scala che lega un pixel a una lunghezza vera.

L'interazione con l'utente serve ad assicurare valori corretti nella calibrazione, nella successiva fase di analisi delle immagini invece sono richiesti meno input. Lo schema di funzionamento di questo programma, con i relativi input richiesti, è rappresentato nella seguente Figura 2.10, presa da [10]

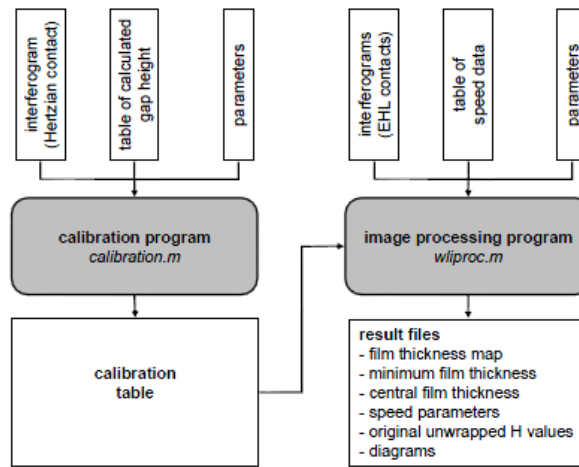


Figura 2.10: Schema di funzionamento del programma utilizzato, da [10].

Questo programma permette di svolgere anche analisi di gruppi di immagini, possibilità fondamentale per le condizioni di transitorio, in uscita è possibile ottenere i valori dell'attrito e delle altezze del meato in forma numerica o come grafici, sia tridimensionali che bidimensionali.

#### 2.4.1 Principi di funzionamento dell'algoritmo di analisi delle immagini

In passato sono stati studiati molti algoritmi diversi per analizzare le immagini, molti dei quali però davano risultati insoddisfacenti per contatti EHL. La scelta finale è stata quella di utilizzare un metodo di pseudo-integrazione bidimensionale, basato sull'integrazione dipendente dalla traiettoria seguita. Questo metodo permette di ridurre gli errori se tutte le diverse traiettorie utilizzate partono dallo stesso punto ([10]).

I valori di  $H$  unwrapped sono ottenuti mettendo insieme i risultati dell'integrazione monodimensionale sulle singole traiettorie, e interpolando i valori che non sono compresi su di esse, questo metodo è scelto appositamente per contatti circolari in cui il punto centrale fa da origine delle traiettorie di integrazione che vanno verso l'esterno.

Per rendere l'analisi ancora più precisa, l'algoritmo non lavora direttamente con i dati

della mappa di  $H$  wrapped originale, ma avviene prima una fase di pre-processing in cui la matrice dei dati è ottenuta lungo una sequenza di linee radiali a intervalli angolari di incremento noto, fino a coprire l'area di contatto. I valori ricavati su ogni percorso, sono messi in righe di una nuova matrice, in modo che la prima colonna abbia i valori  $H$  wrapped del punto centrale, e l'ultima colonna contenga i valori dei punti sulla circonferenza di diametro massimo. Il principio di questa trasformazione di coordinate è mostrato nella seguente Figura 2.11, estratta da [10].

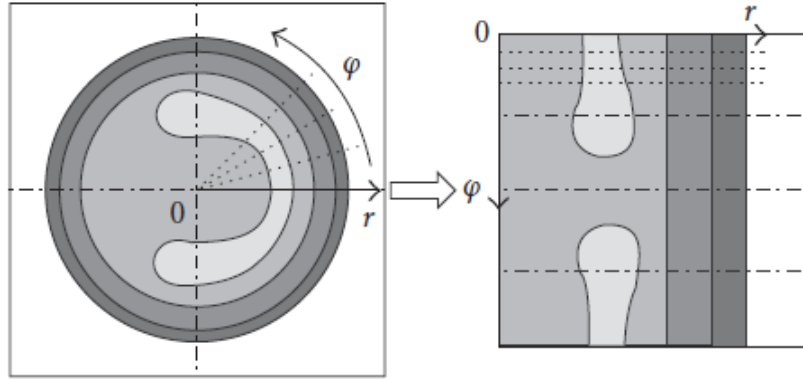


Figura 2.11: Trasformazione di coordinate precedente al phase unwrapping, da [10].

Successivamente a questa fase di pre-processing viene effettuato l'unwrapping con l'algoritmo monodimensionale che permette di unwrap riga per riga la matrice ottenuta dal pre-processing, decidendo a quale termine aggiungere o sottrarre un valore numerico, in base al fatto che confrontando tra loro elementi consecutivi, questi abbiano una differenza entro una soglia  $T < 1$ , dove il valore  $T$  è un parametro da assegnare.

Alla fine la matrice unwrapped risultante è riconvertita nelle coordinate originali. In quest'ultima fase vengono sfruttati dei filtri e dei procedimenti di interpolazione, perchè la trasformazione potrebbe dare errori nell'invertire la funzione, quindi occorrono alcuni script mediante Matlab, come filtro si utilizza un filtraggio per convoluzione secondo il metodo FIR ([15]) con cui sostituisco ogni elemento della matrice con la media pesata dei suoi vicini.

Questo algoritmo pseudo-bidimensionale è stabile se la soglia  $T$  non è più piccola di due volte il valore massimo del disturbo presente nella matrice. Il successo del processo di unwrap però dipende dalla qualità delle immagini, in particolare dall'ampiezza della discontinuità di fase e dal rapporto tra segnale e disturbo. Se si manifestano errori, nascono discontinuità locali che non sono del tutto rimosse e si propagano radialmente.

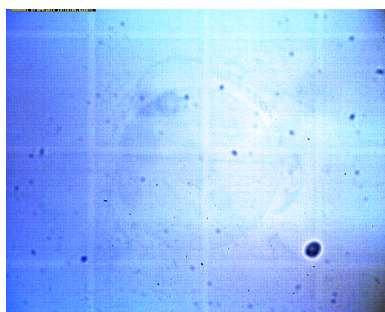
## Capitolo 3

# Calibrazione delle immagini interferometriche

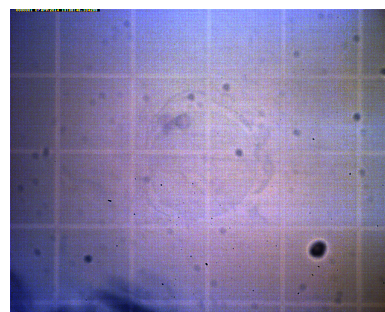
In questo capitolo vengono descritte le fasi del processo di calibrazione delle immagini, per ottenere il legame tra la tonalità del colore  $H$  e l'altezza del contatto. Per ottenere ciò, è necessario partire da un tipo di contatto di cui è nota la dimensione dell'impronta hertziana e la distanza tra i corpi all'esterno di essa. La tavola di calibrazione verrà analizzata in diverse condizioni, in modo da rilevarne la validità. Per maggiori dettagli sul linguaggio Matlab utilizzato per la calibrazione delle immagini, si fa riferimento a [10].

### 3.1 Misura della lunghezza di un singolo pixel

La corretta calibrazione del colore nelle immagini, richiede la conoscenza del valore della lunghezza di un pixel, misurato in  $\mu\text{m}$ . Per ottenere ciò, viene utilizzata una griglia calibrata di lato 0,5 mm, in materiale trasparente. Tale griglia viene interposta tra la sfera e il disco, e ingrandita mediante microscopio con diversi ingrandimenti. Oltre al microscopio, viene utilizzato un sistema ottico di ingrandimento costante  $\times 2$ . Dai diversi ingrandimenti possibili mediante il microscopio, nella seguente Figura 3.1(a) viene mostrata la griglia con l'ingrandimento massimo  $\times 4.5$  mentre nella Figura 3.1(b)  $\times 3$ .



(a)



(b)

Figura 3.1: Dimensioni della griglia calibrata con diversi ingrandimenti del microscopio: ingrandimento  $\times 4.5$  (a),  $\times 3$  (b).



Dalle prove con e senza olio, con l'interposizione della griglia, non sono stati riscontrati cambiamenti. Tali figure sono state analizzate con il software Gimp in modo da ottenere il numero di pixel corrispondenti al lato di 0,5 mm, di conseguenza, utilizzando anche altri ingrandimenti, è stato possibile ottenere la seguente Tabella 3.1

Ingrandimento	Numero pixel	Lunghezza pixel [ $\mu\text{m}$ ]
x2	160	3.125
x3	250	2
x4	326	1.55
x4.5	382	1.315

Tabella 3.1: Valori della lunghezza dei pixel in  $\mu\text{m}$  per diversi ingrandimenti.

La lunghezza di un pixel è necessaria per passare dai pixel delle immagini alla coordinata radiale, in funzione della quale è possibile sfruttare la conoscenza della distanza tra sfera e disco ottenuti in precedenza. Nelle successive immagini verrà utilizzato l'ingrandimento massimo del microscopio x4.5 e l'ulteriore x2 dato dal sistema ottico, in modo da ottenere più dati possibile e in qualità migliore.

## 3.2 Calibrazione del contatto tra camma sferica e piano

### 3.2.1 Modello teorico del contatto sfera-piano

Per ottenere la tavola di calibrazione, con cui si lega altezza dell'impronta al colore H UNWARPPED, il metodo più pratico, in accordo con l'attrezzatura utilizzata è quello di registrare immagini di un contatto hertziano di impronta nota e associare  $H_u$  ottenuta con i corrispondenti valori dell'altezza.

Per il modello teorico del calcolo dell'impronta hertziana e della distanza tra i corpi nella all'esterna di essa, si fa riferimento alla teoria di Hertz e a quella di Boussinesq per le deformazioni [16], la deformazione dei due corpi in seguito al contatto, nel caso di sfera in acciaio AISI56100 (100Cr6) di diametro 60,32 mm e una forza di 1 N, è mostrata nella seguente Figura 3.2

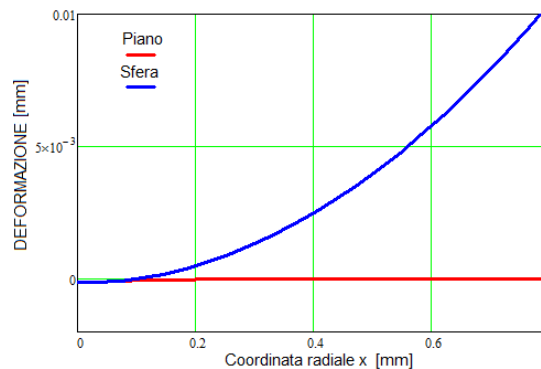


Figura 3.2: Deformazione della sfera e del piano, in seguito al contatto.

il risultato della distanza tra i due corpi all'esterno dell'impronta hertziana risulta essere

$$h(x) = \frac{a \cdot P_{hz}}{E'} \cdot \left[ \left( \frac{x^2}{a^2} - 2 \right) \cdot \arccos \frac{a}{x} + \sqrt{\frac{x^2}{a^2} - 1} \right] \quad (3.1)$$

dove  $a$  è il raggio dell'area di contatto della teoria di Hertz,  $E'$  è il modulo di Young equivalente,  $P_{hz}$  è il valore massimo della pressione hertziana,  $x$  è la coordinata radiale dal centro del contatto, che assume valori maggiori di  $a$ , in modo da essere all'esterno dell'impronta. L'andamento della distanza (nelle condizioni indicate in precedenza) è rappresentato nella seguente Figura 3.3

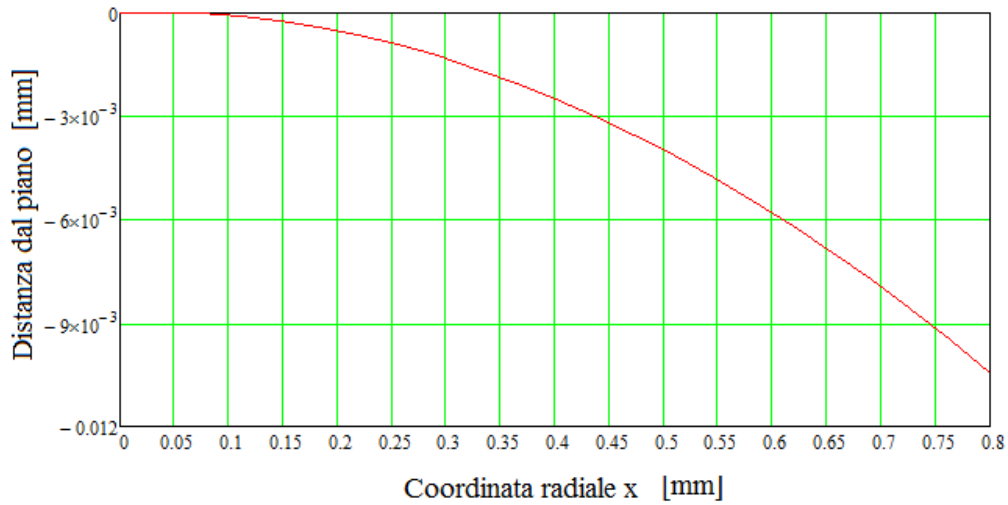


Figura 3.3: Distanza tra la sfera in acciaio di diametro 60.32 mm e il disco in vetro, per una forza di 1 N.

Tale distanza in funzione della coordinata radiale, viene salvata in una matrice due colonne in formato Excel: la prima colonna corrisponde alla coordinata radiale rispetto al centro di contatto, la seconda colonna è il valore dell'altezza, con segno negativo in quanto l'origine viene fissata sul piano del disco in vetro e l'asse  $z$  ha verso positivo nella direzione opposta alla sfera. Questa matrice viene utilizzata come input nel programma in Matlab per effettuare la calibrazione del colore delle frange interferometriche.

### 3.2.2 Calibrazione del colore

Una volta note la distanza tra la sfera e il disco, e la lunghezza di un pixel, è possibile inserire le immagini interferometriche del contatto nel programma in Matlab di [10] ed effettuare la calibrazione vera e propria, per ottenere il legame tra la tonalità  $H$  del colore e l'altezza del contatto.

La sfera utilizzata per la calibrazione è di diametro 60,32 mm, ed è posizionata in modo da toccare il disco in vetro. Il contatto è stato studiato con e senza olio lubrificante, in modo da verificare l'influenza del diverso indice di rifrazione, ed evitare compensazioni nelle successive prove lubrificate, l'influenza della pressione su di esso non è rilevabile in

quanto all'esterno del contatto la pressione è atmosferica. Utilizzando l'ingrandimento massimo del microscopio  $\times 4.5$ , è stato possibile ottenere la seguente Figura 3.4(a) del contatto sfera-disco, per una forza di 1N e senza lubrificante

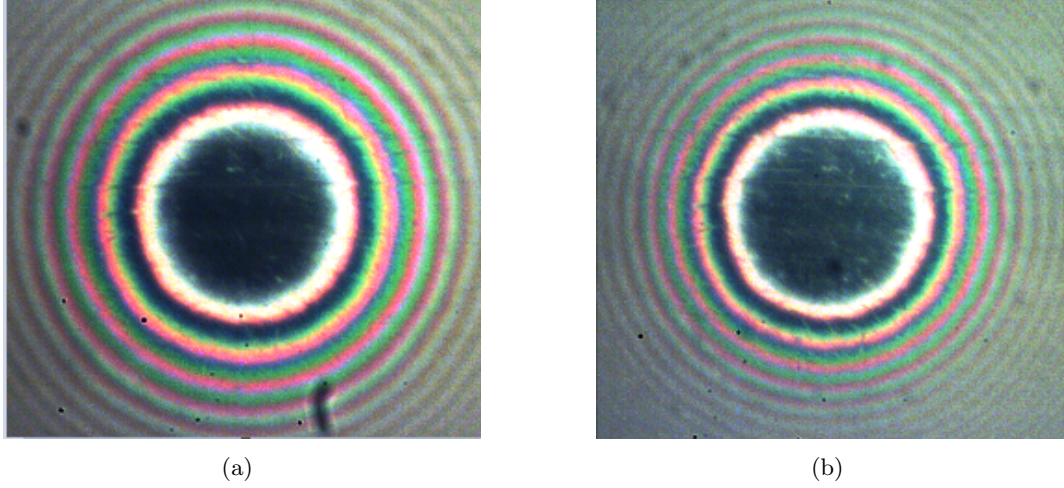


Figura 3.4: Immagini utilizzate per la calibrazione: senza olio (a), con olio SAE 5W-40 (b).

inserendo invece del lubrificante di tipo SAE 5W-40 sulla sfera, lasciando invariate la forza applicata e la luce, l'immagine interferometrica cambia, come visibile in Figura 3.4(b).

Dal confronto delle due figure è ben visibile come l'immagine con olio abbia colori meno accesi e frange più sottili, a causa del coefficiente di rifrazione intorno a 1.5 invece di quello dell'aria che è 1, si nota anche un restringimento dell'impronta hertziana. Sfruttando il software Camware è stato possibile conoscere i parametri dei colori e salvare le immagini in formato .TIFF .

Avviando lo script di Matlab per la calibrazione, estratto da [10], si inseriscono il file Excel sulla distanza sfera-disco e la lunghezza dei pixel in  $\mu\text{m}$ , poi la precedente Figura 3.4(b), la quale viene convertita nello spazio HSV, in modo da lavorare con una sola componente, che è la tonalità H.

Nel programma, occorre scegliere il punto centrale del contatto, sfruttando l'aiuto del display, in modo da avere dei cerchi concentrici con le frange.

Accettando il punto centrale, si avvia la conversione delle coordinate descritta nel capitolo precedente, per ottenere la mappa WRAPPED del valore di H. Su tale mappa in coordinate polari, l'angolo non va da 0 a  $360^\circ$  ma copre solo settori angolari della mappa, in questo modo il range di altezza misurabile, risulta coperto anche se l'area del contatto è molto grande.

La matrice ottenuta da questa operazione viene elaborata con l'algoritmo di PHASE UNWRAPPING riportato in [15], in modo da rendere più monotona possibile la relazione di H unwrapped lungo la coordinata radiale X, e possono emergere errori dovuti alla presenza di graffi sul disco in vetro e a macchie sull'ottica. Per migliorare l'operazione di Phase UNWRAPPING, è possibile modificare la soglia T fino a ottenere una forma più monotona possibile, come mostrato nella seguente Figura 3.5(a) in cui la soglia è di 0.3

mentre nella Figura 3.5(b) la soglia è di 0.25

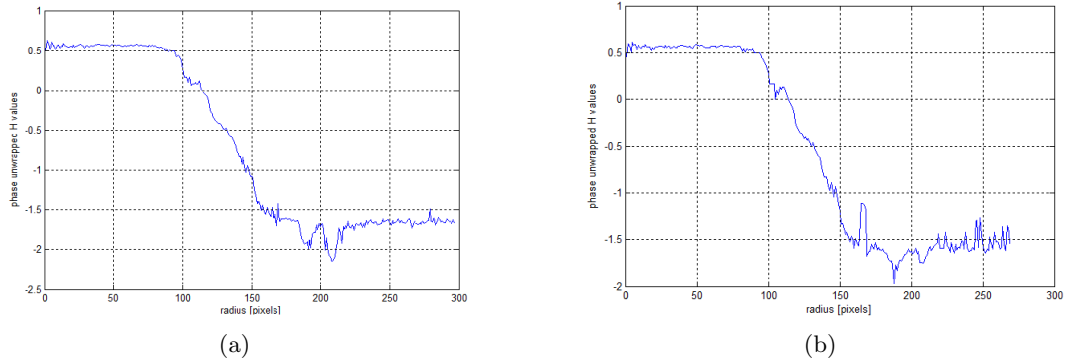


Figura 3.5: Risultati di PHASE UNWRAPPING con diverse soglie: 0.3 (a), 0.25 (b).

Nella fase successiva all'UNWRAPPING, il programma consente di scegliere quali righe della matrice tenere e quali eliminare, la scelta deve ricadere sulle righe che hanno H UNWRAPPED decrescente in modo più monotono possibile, sono permessi valori diversi dovuti a errori. Le righe selezionate come ammissibili, vengono utilizzate per ottenere la tavola di calibrazione. Dall'analisi della precedente Figura 3.4(b) si ottiene la seguente tavola di calibrazione Figura 3.6, in condizione di contatto lubrificato.

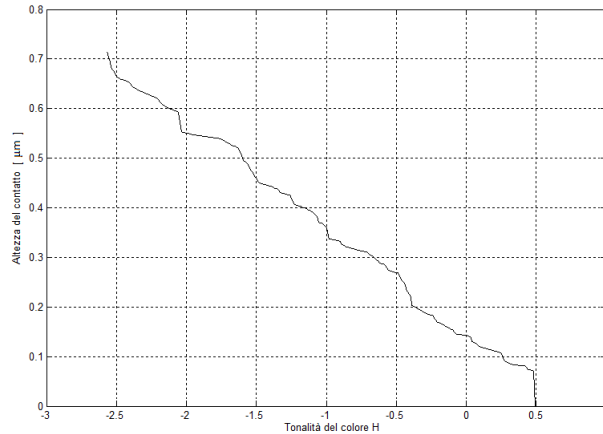


Figura 3.6: Tavola di calibrazione ottenuta per la camma sferica.

nella zona del contatto hertziano si ha il tratto verticale, oltre questo si ha H monotona, inoltre alcuni scalini sono dovuti a interferenze.

La risoluzione della tavola di calibrazione dipende dalla risoluzione di H. Nel caso di immagini a 24 bit, lo spazio HSV ha 8 bit per ogni canale, quindi può usare 255 colori. Il valore di H dopo l'UNWRAPPING passa da 1 a circa 3, quindi si ha  $255 \cdot 3 = 765$  valori distribuiti su un'altezza di circa  $0.7 \mu\text{m}$ , e se la funzione di calibrazione è assunta lineare, la differenza di altezza tra due punti successivi sarà di circa  $0.7/765 = 0.9 \text{ nm}$ , migliorabile utilizzando colori a 10 bit.

Sulla risoluzione influiscono anche altri fattori, a esempio la distanza tra due pixel consecutivi, vista in precedenza, ma anche la curvatura della sfera, inoltre si hanno problemi dovuti alla non linearità della funzione di calibrazione, infatti in alcuni punti della Figura 3.6 è visibile come a una piccola variazione di  $H$  corrisponda una elevata variazione dell'altezza. Altro parametro che incide sulla risoluzione è la rugosità superficiale, che provoca errori di misura.

Per evitare differenze con le immagini successive, è necessario salvare il bilanciamento dei colori, ciò è possibile mediante il software Camware, la cui finestra di bilanciamento è riportata nella Figura 3.7

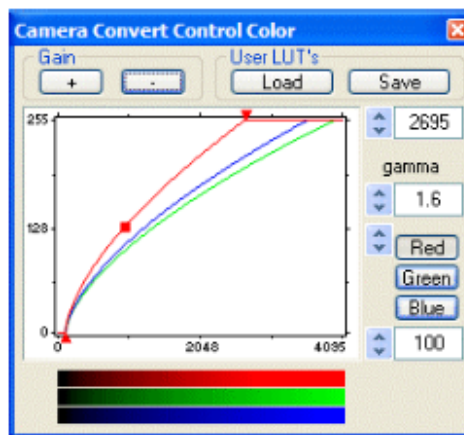


Figura 3.7: Scheda di controllo del colore del software Camware.

### 3.2.3 Influenza del lubrificante nella calibrazione

La presenza dell'olio lubrificante nel contatto sfera-disco, provoca delle differenze nelle immagini, come visto nelle precedenti Figura 3.4(a) e Figura 3.4(b), tutto ciò è dovuto alla differenza tra l'indice di rifrazione dell'aria che vale 1 e quello dell'olio che vale circa 1.5.

Per avere una stima dell'indice di rifrazione, sono state sfruttate due tecniche:

1. la prima tecnica seguita è stata quella di sfruttare il software Gimp per conoscere il numero di comprese nello spessore delle frange delle Figura 3.4(a) e Figura 3.4(b) ed effettuarne il rapporto. In questo modo il risultato ottenuto indicherebbe un indice di rifrazione di circa 1.39;
2. la seconda tecnica seguita è stata quella di sfruttare lo script di Matlab per ottenere le tavole di calibrazione delle due immagini, tracciare le rette che approssimano tali curve, e fare il rapporto dei coefficienti angolari di queste rette. Queste rette non hanno coefficienti angolari di 1 e 1.5 ma il loro rapporto angolare coincide con il rapporto tra gli indici di rifrazione di aria e olio, e siccome quello dell'aria è 1, il risultato indica l'indice di rifrazione dell'olio, che in questo caso risulta essere circa 1.43;

nella seguente Figura 3.8 vengono mostrate le due curve di calibrazione, di cui quella con olio è la stessa di Figura 3.6, le linee tratteggiate indicano le rette che danno un'approssimazione lineare delle curve di calibrazione, in base alla seconda tecnica seguita.

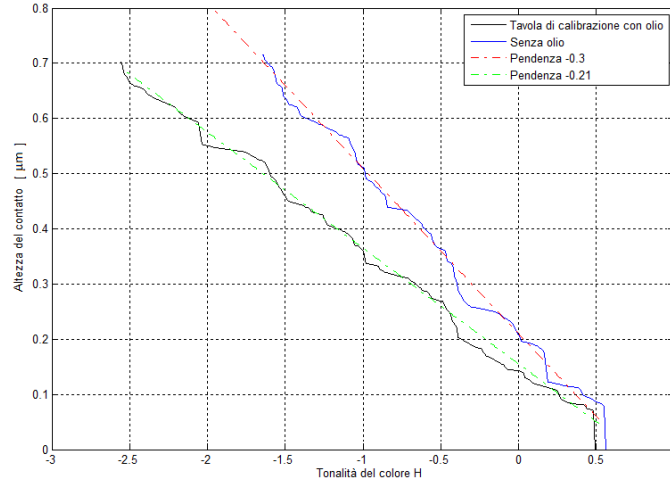


Figura 3.8: Confronto tra le curve di calibrazione delle Figura 3.4(a) e Figura 3.4(b) e in tratteggio le rette che ne approssimano l'andamento.

### 3.2.4 Proprietà della tavola di calibrazione

Per poter validare la tavola di calibrazione ottenuta, sono state effettuate delle prove con diversi carichi applicati e con diversi ingrandimenti, in modo da rilevare possibili cambiamenti.

Le prove svolte con diversi carichi sono indicate nella seguente Figura 3.9, in cui sono presi in esame i casi di applicazione di 1 N, 5 N, 10 N, 20 N.

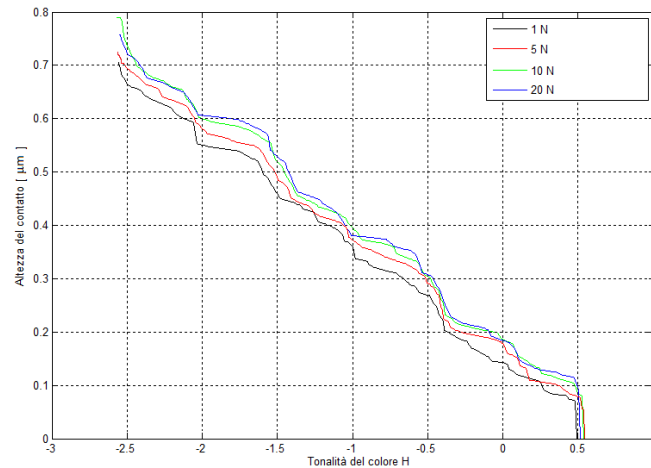


Figura 3.9: Confronto della tavola di calibrazione con diverse applicazioni del carico.

Dalla precedente figura, è possibile vedere come l'influenza del carico incida solo sulla zona vicino l'impronta hertziana, che risulta maggiore con carichi maggiori, mentre allontanandosi da essa, la tavola di calibrazione torna a essere circa la stessa in ogni caso.

Per quanto riguarda la verifica della validità della tavola di calibrazione con i diversi ingrandimenti, le prove svolte sono illustrate nella seguente Figura 3.10, in cui sono presi in esame i casi di ingrandimento x4.5 , x4 , x3, x2, tutti in condizione di contatto lubrificato.

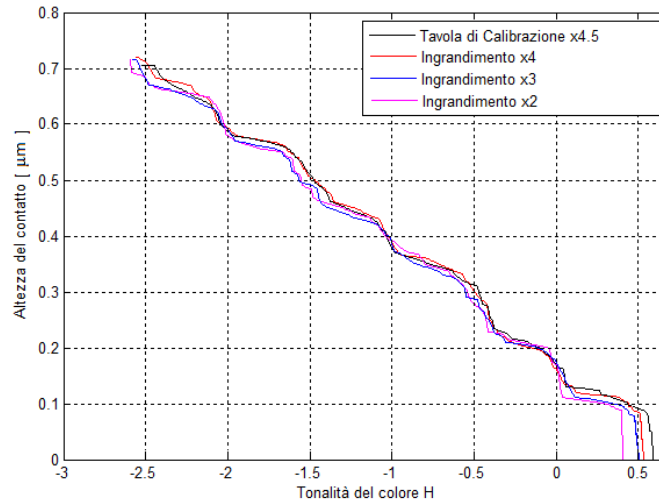


Figura 3.10: Confronto della tavola di calibrazione con diversi ingrandimenti.

Anche nel caso di diversi ingrandimenti, la tavola di calibrazione risulta essere all'incirca la stessa, con alcune differenze dovute alla diversa luce necessaria per osservare il contatto, comunque nei tre casi l'andamento è molto simile, confermando la validità della calibrazione.

### 3.3 Calibrazione del contatto tra camma spline e piano

La camma spline utilizzata, è quella utilizzata anche nelle prove sperimentali di [19], [20], e [22] è in acciaio 16 *CrNi4* e ha una circonferenza di base di raggio pari a 14 mm. I termini relativi ai tratti di riferimento della camma, tipici di una struttura di questo genere, sono indicati come:

- il cerchio di base di raggio  $R_b$ , caratterizzato da un raggio di curvatura costante;
- la rampa di raccordo, un breve tratto curvilineo che collega il cerchio base al fianco;
- il fianco, un tratto rettilineo o curvilineo, responsabile della legge di moto vera e propria, caratterizzato da un raggio di curvatura molto grande, in corrispondenza di esso si ha la massima velocità del punto di contatto;
- la testa, un tratto curvilineo che raccorda i due fianchi. In corrispondenza della sommità della testa la camma produce la massima alzata e al tempo stesso la velocità del punto di contatto si annulla, provocando l'inversione del moto.

i vari tratti appena descritti, vengono indicati nella Figura 3.11, in cui vengono anche mostrati i settori angolari corrispondenti.

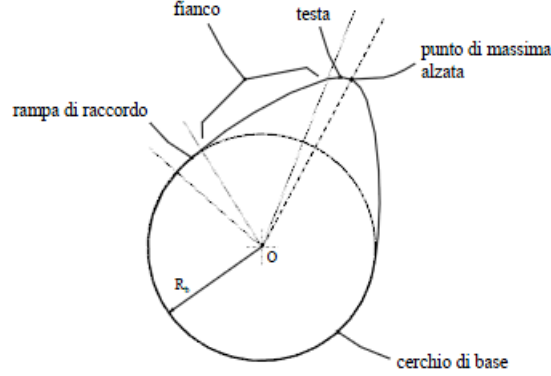


Figura 3.11: Punti di riferimento tipici di una camma generica.

In particolare, la camma spline utilizzata, ha la forma approssimabile con delle funzioni diverse nei diversi tratti del profilo, in particolare sono presenti dei tratti lineari utilizzati per ridurre le forze causate dall'urto della valvola di aspirazione o scarico all'istante di apertura e di chiusura del condotto, in applicazioni motoristiche, tali punti saranno vantaggiosi per la successiva analisi delle immagini. Queste funzioni sono state ricavate in [20], a partire da alcuni punti del profilo noti.

Le leggi di alzata e gli andamenti della velocità prodotti da questo profilo saranno mostrati nel capitolo successivo, e utilizzati con lo scopo di svolgere l'analisi interferometrica.

### 3.3.1 Modello teorico del contatto tra camma spline e piano

Il modello teorico per l'analisi del contatto di linea tra il piano e il cilindro, il cui raggio di curvatura viene preso uguale al raggio di curvatura della camma nell'istante considerato nell'analisi, è stato elaborato dalle teorie di [17] e [18].

L'impronta hertziana del contatto è stata modellata mediante la teoria classica di Hertz sui contatti di linea, mentre la distanza tra i corpi nella zona esterna, è stata modellata seguendo le teorie di [17] basate anche sulla deformazione dei corpi, ottenendo un valore della distanza  $h_{esterna}$  per un cilindro equivalente, relativo al contatto cilindro piano entrambi deformabili, pari a

$$h_{esterna} = \left( \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot L \cdot E_{equivalente}} \right) \cdot \left( \ln\left(\frac{x}{a}\right) + \left(\frac{x^2}{a^2} - 1\right)^{0.5} \right) - \delta_N + \frac{x^2}{2 \cdot R_{equivalente}} \quad (3.2)$$

dove il termine  $\delta_N$  è il termine di avvicinamento del centro del cilindro al piano, dovuto allo schiacciamento e alla deformazione di entrambi i corpi, ed è stato ricavato dalla ricerca di Nordel in [18] e vale

$$\delta_N = \left( \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot L \cdot E_{equivalente}} \right) \cdot \left( 1 + \ln\left(\frac{L^3 \cdot E_{equivalente} \cdot \pi}{2 \cdot F \cdot R_{equivalente}}\right) \right) \quad (3.3)$$



in cui  $F$  è la forza normale con cui il cilindro è premuto sul disco, misurata mediante dinamometro,  $L$  è la larghezza della camma,  $a$  è la larghezza della semi-impronta hertziana,  $E_{equivalente}$  e  $R_{equivalente}$  sono il modulo di Young e il raggio equivalente forniti dalla teoria di Hertz,  $x$  è la coordinata radiale parallela al piano e normale all'asse del cilindro.

L'equazione 4.3 può essere vista come la somma di tre termini:  $Z_{def} + \delta_N + Z_{indef}$ , in cui il primo indica la distanza tra il profilo del cilindro equivalente indeformato e quello deformato, il secondo termine è dovuto allo schiacciamento dei corpi, in questo caso riferito al cilindro equivalente, e il terzo termine corrisponde alla distanza tra il cilindro e il piano nella situazione indeformata. Questi termini sono riportati in Figura 3.12

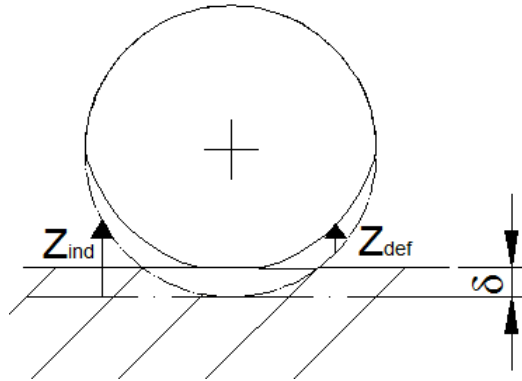


Figura 3.12: Rappresentazione grafica dei termini componenti la formula di 4.3.

Sostituendo l'equazione 3.3 nella 4.3, è possibile ottenere il profilo teorico della distanza del contatto all'esterno dell'impronta hertziana, riportato in Figura 3.13 per il caso di  $F=20$  N e  $R=14$  mm.

Tale profilo è necessario per effettuare la calibrazione e per controllare la validità delle distanze ottenute dallo script di analisi, nel caso di contatto statico, che verrà affrontato nel capitolo successivo.

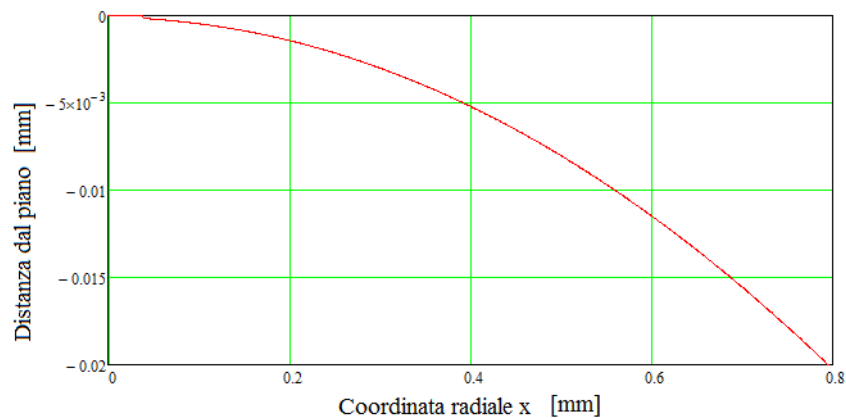


Figura 3.13: Distanza cilindro-piano fuori dall'impronta hertziana, per un cilindro di raggio 14 mm e 20 N di forza.

Così come è stato fatto per la camma sferica, anche adesso occorre salvare una matrice Excel, contenente in una colonna la distanza radiale e nell'altra colonna i valori dell'altezza.

### 3.3.2 Calibrazione del colore

La camma spline, al contrario della precedente sferica, ha il raggio di curvatura che varia nelle diverse posizioni angolari, ciò provoca una variazione della larghezza delle frange nella stessa immagine, come visibile in Figura 3.14 in cui la camma è stata posizionata in prossimità del naso, ed è possibile notare che in seguito alla variazione del raggio di curvatura le frange passino da larghe (raggio maggiore) a strette (raggio minore).

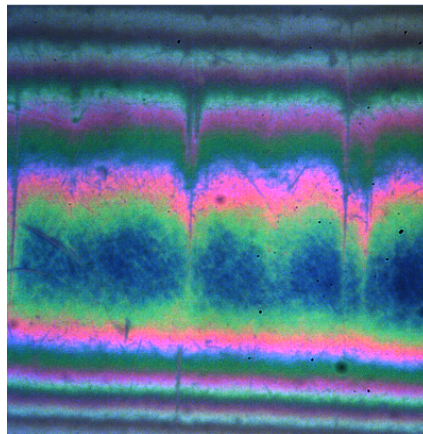


Figura 3.14: Rappresentazione delle diverse frange dovute ai diversi raggi di curvatura.

La camma utilizzata è stata caricata con 20 N e posizionata in corrispondenza del cerchio di base, in modo da sapere con esattezza il raggio di curvatura ed evitare i problemi delle diverse frange visti in precedenza.

L'immagine utilizzata per la calibrazione è la seguente Figura 3.15, ottenuta con un ingrandimento x4.5 e in presenza di olio SAE 5W-40, mantenendo le stesse impostazioni dei colori utilizzati per la camma sferica.

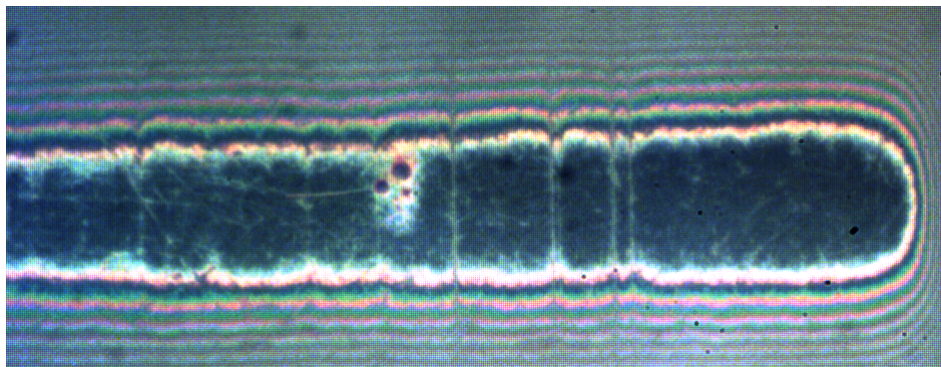


Figura 3.15: Immagine della camma spline utilizzata per la calibrazione.

È possibile notare come sia possibile vedere solo una estremità della camma, ciò è dovuto al fatto che la camma ha una larghezza di 8 mm e nemmeno con l'ingrandimento minimo permesso dal microscopio è possibile vedere tutta la lunghezza del contatto, perciò quello mostrato in figura ne rappresenta 1.2 mm, comunque i diversi ingrandimenti non alterano la tavola di calibrazione ottenibile, come verrà dimostrato nei successivi paragrafi.

Le prove per la calibrazione inoltre sono state effettuate su diverse zone del contatto: le due estremità e la zona centrale, ottenendo la tavola di calibrazione invariata.

Inserendo l'immagine precedente nello script di calibrazione e ripetendo i passi descritti nei paragrafi precedenti, si riesce a ottenere la tavola di calibrazione per la camma spline Figura 3.16

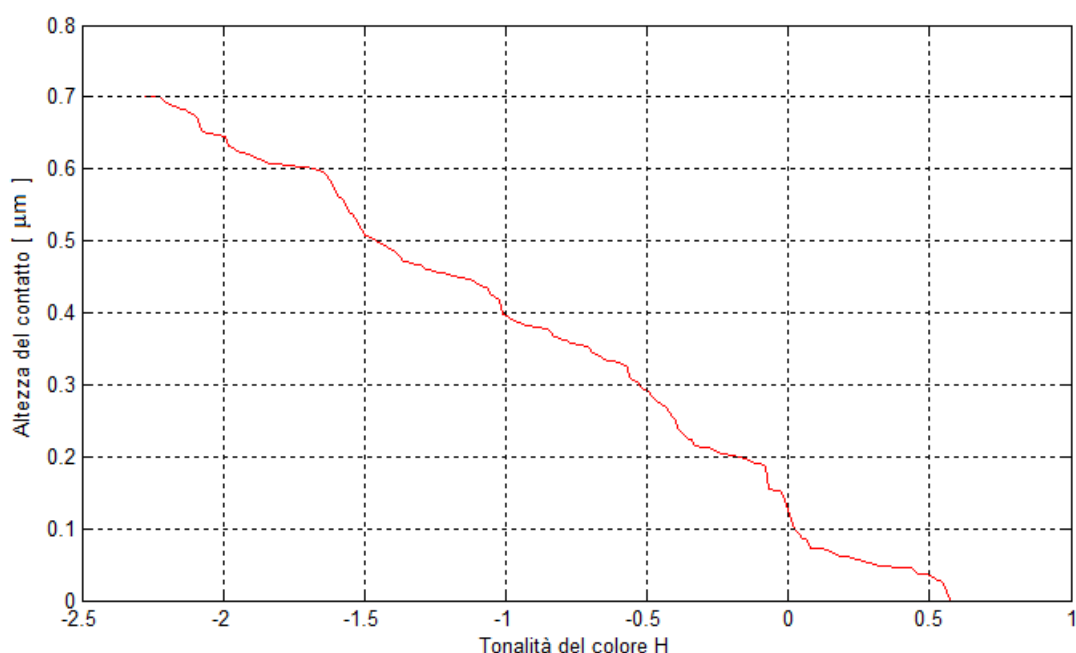


Figura 3.16: Tavola di calibrazione ottenuta per la camma spline.

il valore dell'altezza massima misurabile, risulta leggermente inferiore al caso della camma sferica, e viene raggiunto a un livello di tonalità inferiore, tali differenze sono collegabili ai diversi materiali con cui sono fatte le camme, un confronto più dettagliato verrà svolto in seguito.

### 3.3.3 Influenza del lubrificante nella calibrazione

Anche per la camma spline, viene effettuato il controllo sull'effetto della presenza del lubrificante nel contatto, in quanto nelle successive prove in movimento il contatto sarà necessariamente lubrificato. Tale confronto è rappresentato nella seguente Figura 3.17 vengono mostrate inoltre le rette approssimanti tali tavole di calibrazione, e dal rapporto tra i coefficienti angolari di tali rette, si ottiene 1.44 che indica il valore approssimato del coefficiente di rifrazione dell'olio, ed è molto simile a 1.43 ottenuto con la camma sferica.

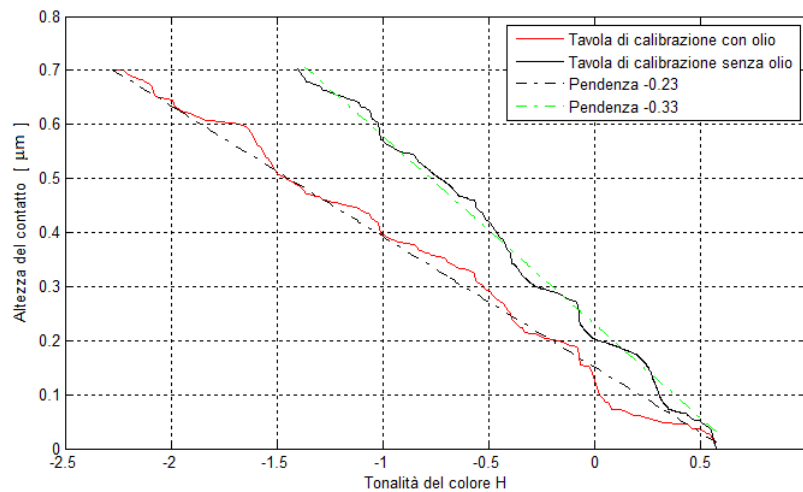


Figura 3.17: Confronto tra la curva di calibrazione con e senza olio, e le rette che ne approssimano l'andamento.

### 3.3.4 Proprietà della tavola di calibrazione

Come è stato fatto per la camma sferica, anche per quella spline vengono fatti i controlli di validità, studiandone le proprietà al variare della forza e degli ingrandimenti, in modo da verificare che si mantenga invariata. Le tavole di calibrazione ottenute con diverse forze per la camma spline, sono mostrate nella seguente Figura 3.18

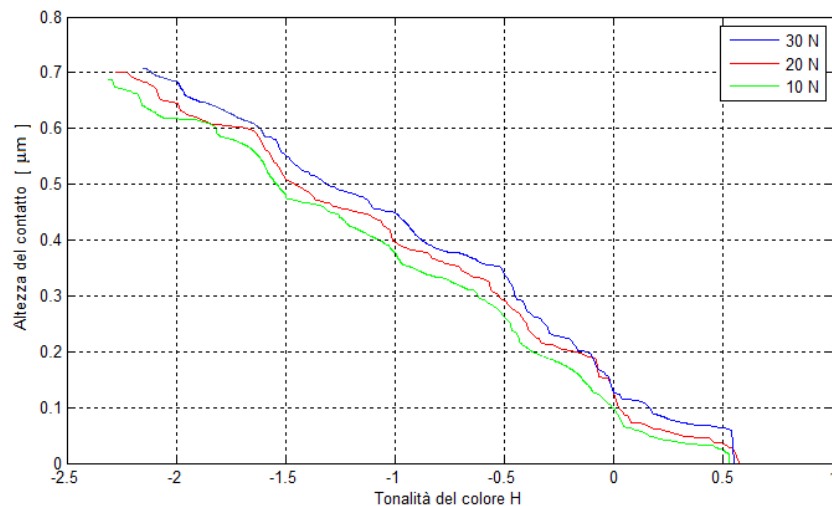


Figura 3.18: Confronto della tavola di calibrazione con diverse applicazioni del carico.

nella Figura 3.19 invece, vengono mostrate le diverse tavole di calibrazione della camma spline ai diversi ingrandimenti.

Dalle due figure precedenti risulta come la tavola di calibrazione vari poco con diverse forze e ingrandimenti, ciò garantisce validità alle successive prove in movimento, che saranno

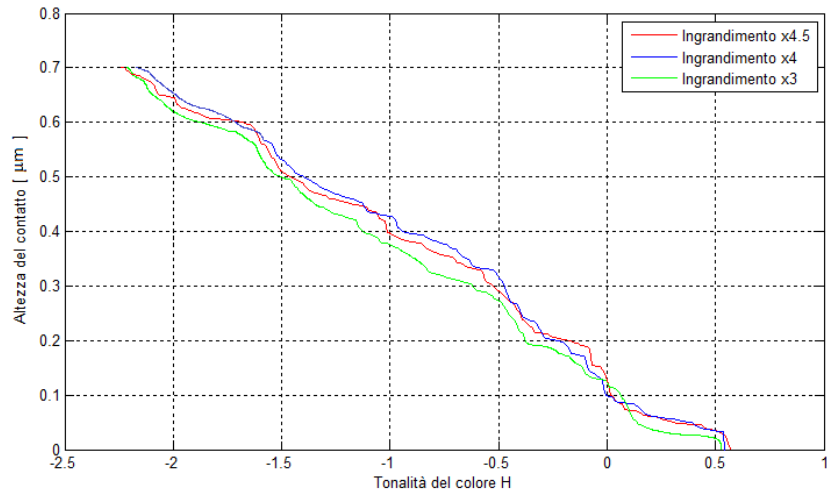


Figura 3.19: Confronto della tavola di calibrazione con diversi ingrandimenti.

soggette a carichi variabili e a ingrandimenti tali da vedere più possibile il contatto.

### 3.4 Confronto tra le tavole di calibrazione della camma sferica e della camma spline

Le due camme utilizzate sono in materiali diversi, quella sferica è in acciaio 100Cr6 mentre quella spline è in acciaio 16 CrNi4, e dalle precedenti delle tavole di calibrazione (Figura 3.6 e Figura 3.16), si nota una differenza di pendenza, dovuta alle diverse proprietà riflettenti dei due materiali. Nella Figura 3.20 tale confronto viene messo in evidenza

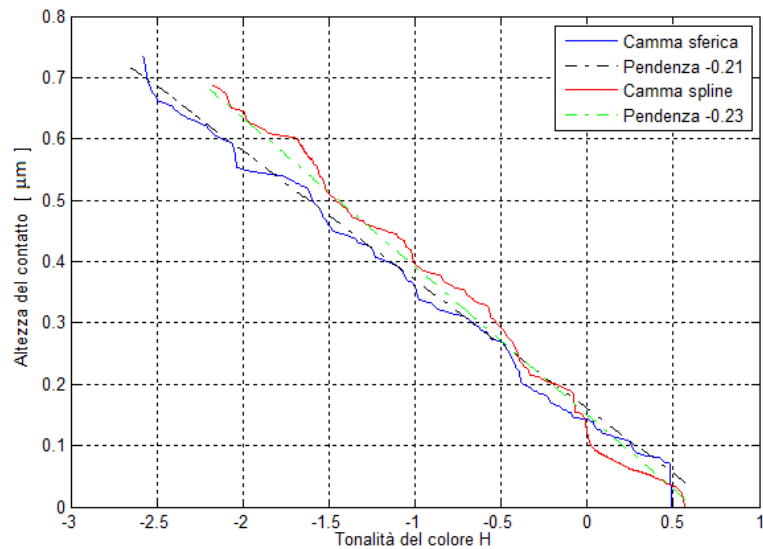
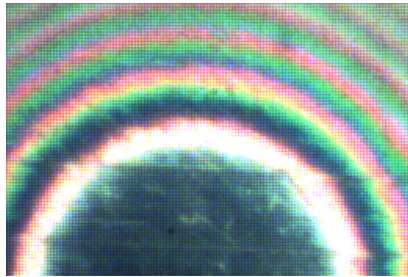


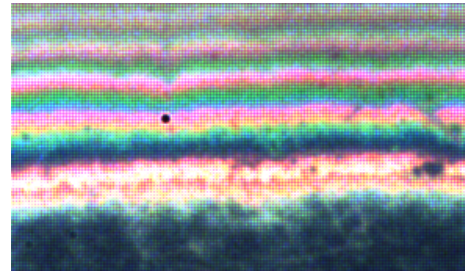
Figura 3.20: Confronto tra le tavole di calibrazione delle camme utilizzate.

le due tavole di calibrazione hanno due pendenze diverse, e le curve che ne approssimano l'andamento hanno dei coefficienti angolari in rapporto di circa 1.1.

Le diverse intensità dei colori, nelle stesse condizioni dei valori RGB, ingrandimento e luce, sono mostrate in Figura 3.21(a) per la camma sferica e in Figura 3.21(b) per quella spline.



(a)



(b)

Figura 3.21: Confronto tra le diverse tonalità delle frange per la camma sferica (a) e spline (b).

## Capitolo 4

# Analisi delle immagini interferometriche

In questo capitolo viene utilizzata la tavola di calibrazione del colore, ottenuta al capitolo precedente per la camma spline, per effettuare l'analisi di immagini inerferometriche in campo elastoidrodinamico. Il programma di MATLAB utilizzato è ripreso da [10], e modificato per applicarlo a contatti di linea, e per renderlo più automatico, riducendo gli input dell'utente. Le prove svolte riguardano l'utilizzo della camma spline, e i parametri utilizzati e i risultati ottenuti, vengono descritti dettagliatamente nel capitolo.

### 4.1 Sviluppo del nuovo programma di analisi

Il programma di analisi di [10], si è rivelato poco soddisfacente per l'analisi dei contatti di linea, in quanto sfruttava la simmetria dei contatti circolari e limitava l'analisi a zone ridotte, inoltre richiedeva troppi input da parte dell'utente, rendendo l'analisi di molte immagini molto lenta. A partire da quel programma, sono state fatte delle modifiche in modo da sviluppare uno script di Matlab, in grado di analizzare i contatti di linea, e con un minor numero di input da parte dell'operatore. Il nuovo script è riportato in Appendice A.

Con il nuovo script non è necessario inserire manualmente alcuni input presenti nel precedente programma, ma vengono ottenuti automaticamente, gli input sostituiti sono:

- il punto centrale da cui far partire l'analisi, ma viene ottenuto automaticamente dal programma, sulla base delle dimensioni dell'immagine analizzata, e in questo caso non è un punto, ma una linea;
- i valori di altezza minima e centrale vengono scelti automaticamente dallo script in base ai valori più vicini a quelli teorici, ottenuti dalle formule di Hamrock riportate in seguito, quindi non è più l'utente che deve inserire il valore tra quelli forniti;
- l'analisi viene svolta su tutta l'immagine inserita, non occorre inserire manualmente la distanza desiderata, rendendo più semplice e rapida l'analisi di ogni immagine;
- è stata eliminata la possibilità di sfruttare solo metà immagine tridimensionale e specchiarla per simmetria riducendo gli errori, perchè era una possibilità valida per



i contatti circolari, mentre nei contatti di linea e in particolare con una camma, è necessario vedere tutta l'immagine originale completa, per osservare anche il variare delle frange nelle due metà di immagine, a causa dei differenti raggi di curvatura, come mostrato anche nel capitolo precedente.

Il procedimento di analisi dello script, segue i passi del programma precedente, infatti si ha una prima fase in cui occorre inserire il file della tavola di calibrazione e i parametri della prova: viscosità, parametro di piezoviscosità e i dati di velocità, forza e scorrimento che saranno diversi per ogni immagine relativa a diverse posizioni angolari, perciò conviene inserirli mediante file Excel, in modo che lo script possa prendere i dati autonomamente per ogni immagine.

Successivamente all'inserimento dei dati, viene inserito il nome del file della prima immagine da analizzare, in formato .TIFF e numerata da 0001 in poi, in modo che il programma possa seguire la numerazione automaticamente, occorre dare poi la posizione dei limiti laterali a cui si vuole tagliare l'immagine.

La figura utilizzata in questo esempio dimostrativo è quella di Figura 4.1, che corrisponde a una parte della zona centrale del contatto (0.73 mm invece di circa 1.6) in corrispondenza del cerchio base di raggio 14 mm, con un carico iniziale di 30 N e ingrandimento x4, a partire da tale posizione e con tali precarico e ingrandimento verranno effettuate le successive analisi in movimento.

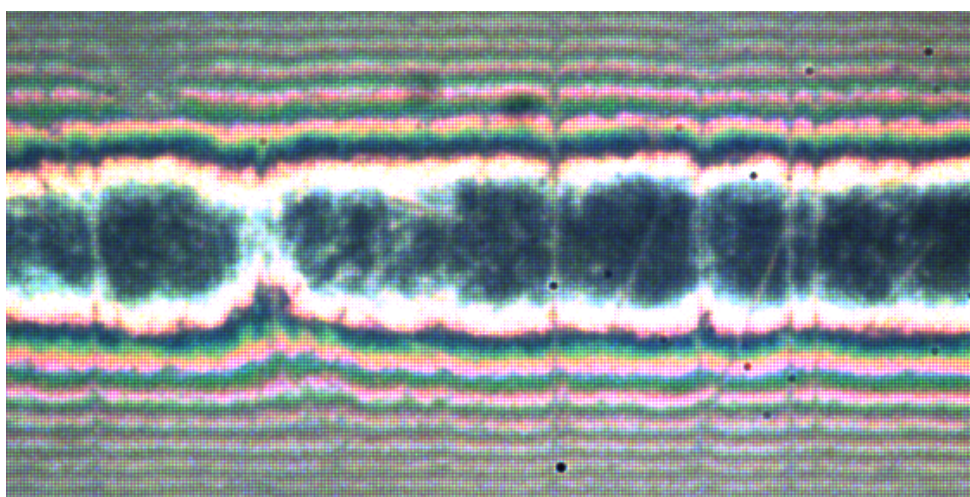


Figura 4.1: Zona parziale del contatto analizzato: 728x368  $\mu\text{m}$ .

Nell'immagine precedente, è possibile rilevare la presenza di graffi sul disco e sulla camma, e soprattutto di zone in cui la camma non è proprio in contatto, dovute a errori di forma della camma stessa, questi problemi saranno visibili nelle successive immagini prodotte dall'analisi.

A questo punto lo script si calcola da solo la linea centrale del contatto, senza ulteriori input da parte dell'utente, e si passa alla fase di calcolo, in cui il processo di unwrapping è lo stesso di [10], ed è possibile regolare la soglia di calcolo per variare l'analisi, in modo da ottenere un profilo più corretto possibile, come nella seguente Figura 4.2(a) in cui si



ha soglia di 0.65 e in Figura 4.2(b) cui la soglia è 0.5, dalla riduzione della soglia, si ha in questo caso un miglioramento del profilo ottenuto, con meno disturbi nella zona lontana dal contatto.

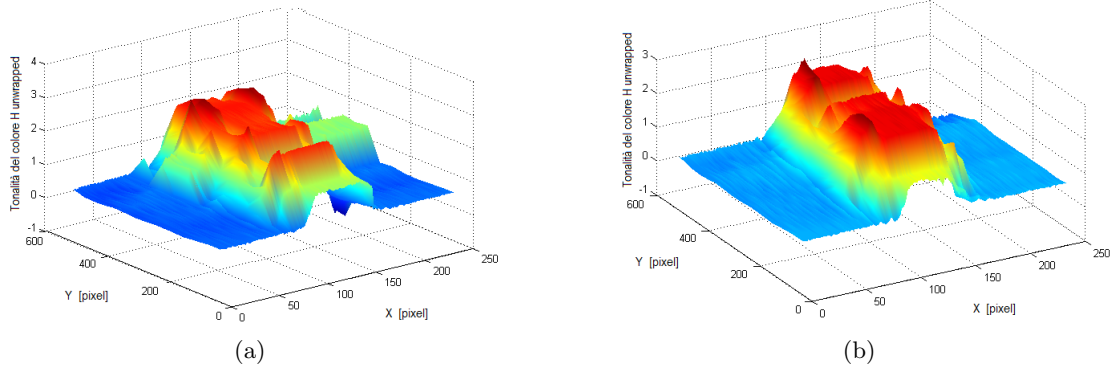


Figura 4.2: Confronto tra le diverse H unwrapped con diverse soglie: 0.65 (a) e 0.5 (b).

Accettata la soglia per l'unwrapping, occorre cliccare mediante mouse sulla posizione del probabile punto di minimo, dopo di che il programma da solo ottiene i valori di altezza centrale e minima e mostra i risultati ottenuti numericamente, e successivamente mostra le immagini degli andamenti tridimensionale dell'altezza, delle sezioni lungo gli assi y e x, e vengono illustrate inoltre le curve di livello del contatto.

In (Figura 4.3) si ha l'andamento tridimensionale dell'altezza del meato, non in scala per motivi di spazio, e si possono notare dei vuoti dovuti ai graffi e agli errori di forma visti nella Figura 4.1.

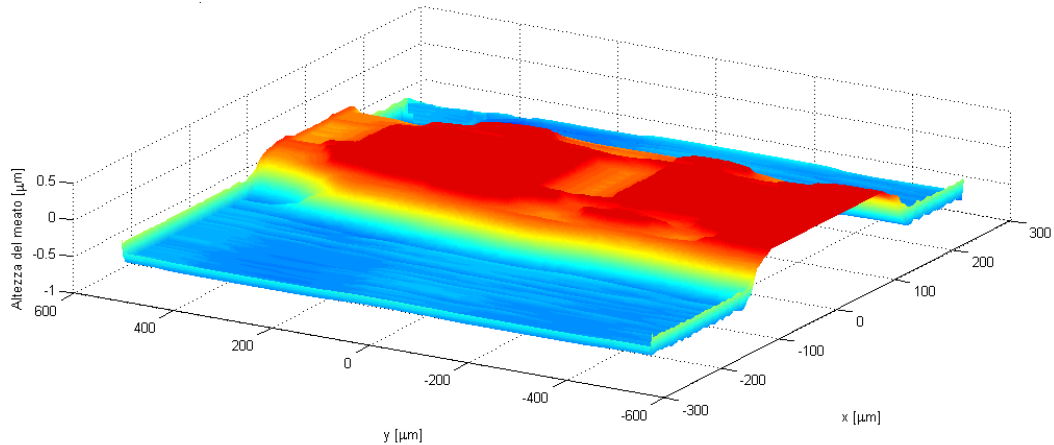


Figura 4.3: Profilo 3d dell'altezza del contatto, ottenuto mediante l'analisi.

Per motivi di spazio, le curve di livello vengono mostrate per una zona parziale del contatto in Figura 4.4, mostrando anche qui la presenza di zone che non sono in contatto, inoltre

è possibile rilevare una certa inclinazione della camma rispetto all'asse  $y$ .

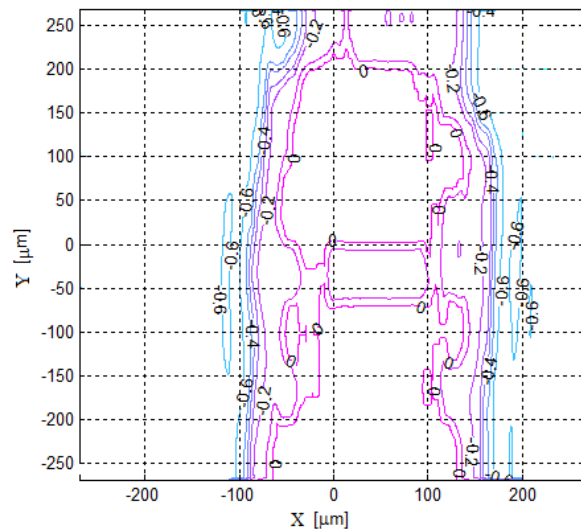


Figura 4.4: Curve di livello dell'altezza, ottenute mediante l'analisi.

Dalla sezione lungo l'asse y in (Figura 4.5), si ottiene anche una stima della profondità delle zone graffiate, e in questo caso si nota anche che questa zona del contatto è ben allineata con il disco.

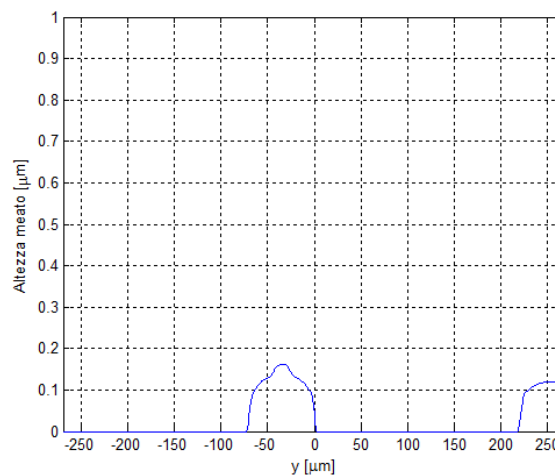


Figura 4.5: Sezione del profilo di altezza, lungo l'asse  $y$ .

Nella sezione lungo l'asse  $x$  di Figura 4.6, è stato inserito anche il profilo teorico dell'altezza del contatto, ottenuto dalla formula 4.3, traslato rispetto allo zero, in modo da coincidere con il centro del profilo della camma, che come visto dalle curve di livello è inclinato. Il profilo teorico mostra una buona somiglianza con il profilo ottenuto dall'analisi interferometrica, si hanno delle differenze nella zona di contatto, in cui la camma non è in contatto,

a causa della rugosità, inoltre tale confronto è valido fino a un'altezza di circa  $0.65 \mu\text{m}$ , oltre cui non si riesce ad analizzare la figura.

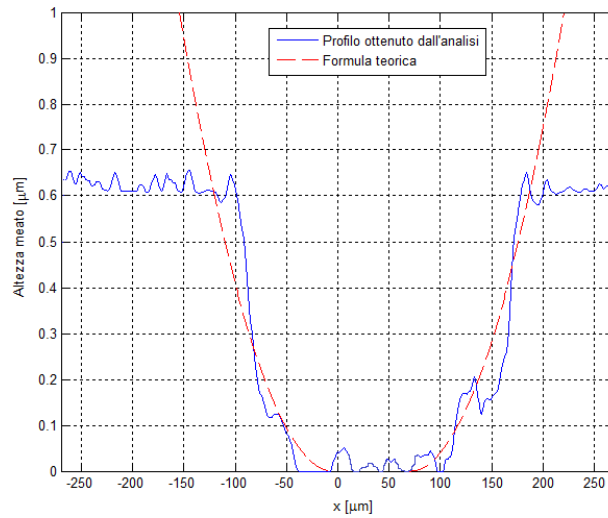


Figura 4.6: Sezione del profilo di altezza, lungo l'asse x, e confronto con il profilo teorico.

Terminata l'analisi, è possibile salvare, cancellare o ripetere l'analisi dell'immagine, se è una sola immagine l'analisi finisce dopo aver salvato o cancellato i suoi dati, altrimenti se sono presenti immagini successive, lo script passa alla loro analisi, sfruttando i dati di velocità, scorrimento e forza inseriti in formato excel, e ripete i passi indicati in precedenza, a partire dall'inserimento automatico della linea centrale.

## 4.2 Descrizione dei settaggi per le prove svolte

Per lo svolgimento di queste prove, a causa del fatto che cambia l'altezza del contatto, e si hanno forze d'inerzia in direzione Z, che variano in modulo e verso, è stato necessario imporre un precarico mediante una molla (Figura 1.1), e non mediante pesi, in modo da evitare il distacco della camma dal disco. In base a esperienze passate ([3] e [6]) è stato scelto di utilizzare un precarico di 30 N, tenendo conto inoltre del fatto che un precarico maggiore avrebbe potuto danneggiare il disco in vetro, la molla utilizzata ha una rigidezza di  $22.02 \text{ N/mm}$ .

La scelta della velocità di rotazione della camma è stata fatta pensando alle forze d'inerzia generate, alle esperienze passate e al precarico applicato, ma soprattutto è stata fatta pensando alla velocità di acquisizione delle immagini della telecamera, la quale risente a sua volta dalla memoria RAM della telecamera stessa. Per avere un tempo sufficiente di acquisizione delle immagini, la frequenza di acquisizione della telecamera è stata settata a 500 immagini al secondo, ed è stato osservato che per frequenze di acquisizione maggiori, si hanno problemi di registrazione. I parametri di acquisizione settati sono:

- tempo di esposizione delle immagini 0.002;
- tempo di ritardo 0 s;

in questo modo, la memoria RAM della telecamera ( di 4 GB), viene occupata da 2860 immagini al massimo (da 1280x1024 pixel, ognuna da circa 1.4 MB), in un tempo di circa 5.7 s. Tenendo conto dei ritardi sui segnali, e sul transitorio iniziale, la velocità di rotazione della camma è stata fissata a 60 giri/minuto, raggiungibile con una rampa di 250 ms, in questo modo si ha un giro ogni secondo, cui corrispondono 500 immagini, di conseguenza lo spazio tra 2 immagini consecutive corrisponde a  $0.72^\circ$ .

Avendo a disposizione dei tempi limitati, e a causa del fatto che la telecamera deve restare fissa e non può traslare nelle diverse posizioni raggiunte dal punto di contatto, a causa del limitato sistema di controllo degli assi, è stato scelto di posizionare la telecamera in corrispondenza di alcuni punti principali:

- cerchio base e naso;
- punti di inversione del moto del contatto in fase di salita e discesa ;
- fianco di salita e di discesa, punti in cui si ha la massima accelerazione ;

Per quanto riguarda il gruppo ottico, è stato utilizzato un ingrandimento x4 del microscopio, sfruttando anche l'ulteriore ingrandimento fisso x2, in modo da poter vedere meglio il movimento del punto di contatto, in questo modo si ottiene una larghezza della corsa di circa 2 mm.

L'acquisizione delle forze mediante dinamometro, è stata fissata a 10000 dati/secondo.

#### 4.2.1 Geometria e cinematica ottenuta dai settaggi

Il sistema di riferimento utilizzato per l'analisi e per i calcoli della cinematica eseguiti, è mostrato nella seguente Figura 4.7, in cui viene indicato anche il verso di rotazione impostato alla camma.

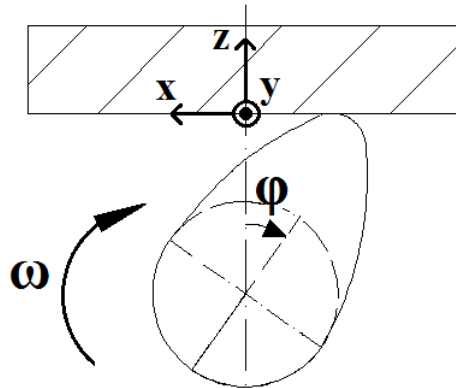


Figura 4.7: Sistema di riferimento utilizzato, e verso di rotazione impostato alla camma.

Impostando la velocità di rotazione della camma a 60 giri/minuto, e utilizzando la camma spline di geometria mostrata in Figura ??, si ottengono i seguenti grafici di velocità (da programma Matlab di [20]), raggio di curvatura equivalente e slide to roll ratio, necessari per l'analisi teorica e delle immagini interferometrica successive. Questi grafici partono

dalla coordinata angolare  $-105^\circ$  circa, in cui inizia l'alzata.

In Figura 4.8, vengono rappresentati il raggio di curvatura locale della camma, nel punto di contatto, e la velocità di entraining dell'olio. Questi parametri sono input necessari per l'analisi delle immagini che verrà svolta successivamente.

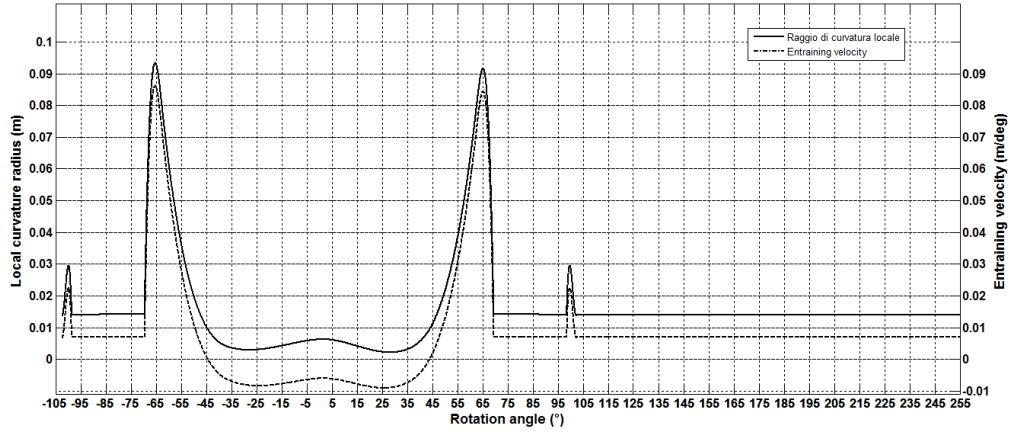


Figura 4.8: Andamento del raggio di curvatura locale e dell' entraining velocity, per la camma e la velocità di rotazione utilizzati.

A causa dello spostamento del punto di contatto, si ha una traslazione del centro di velocità e del centro di curvatura locale, questi andamenti sono mostrati rispettivamente in Figura 4.9(a), e in Figura 4.9(b), dati dall'involuppo delle posizioni assunte dal centro di curvatura locale e dal centro di velocità nel sistema di riferimento solidale al centro del cerchio base della camma.

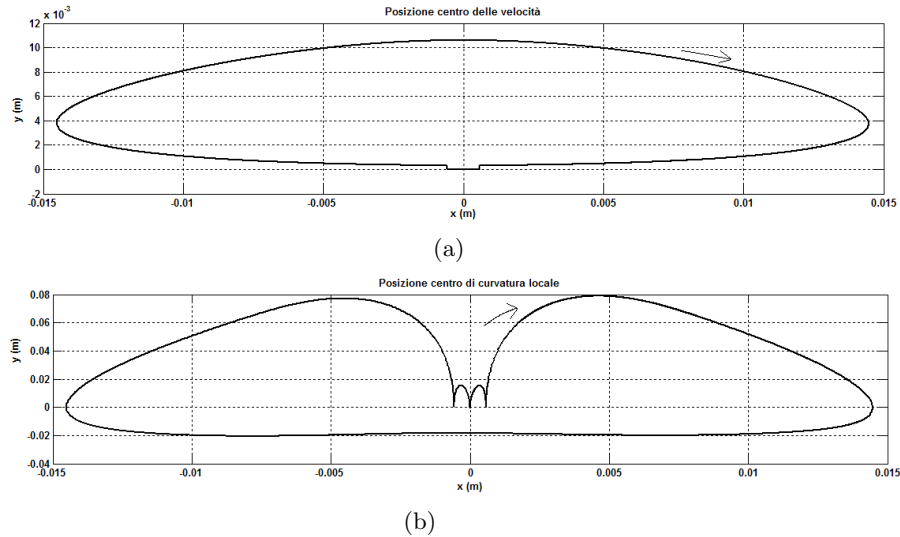


Figura 4.9: Andamenti della posizione del centro di velocità (a) e del centro di curvatura locale (b), nel sistema di riferimento solidale alla camma.

Per quanto riguarda la legge di moto lungo l'asse z (alzata), dalla geometria della camma, si ottiene il seguente andamento della legge di alzata in Figura 4.10 in funzione della coordinata angolare, in cui lo  $0^\circ$ , corrisponde al naso.

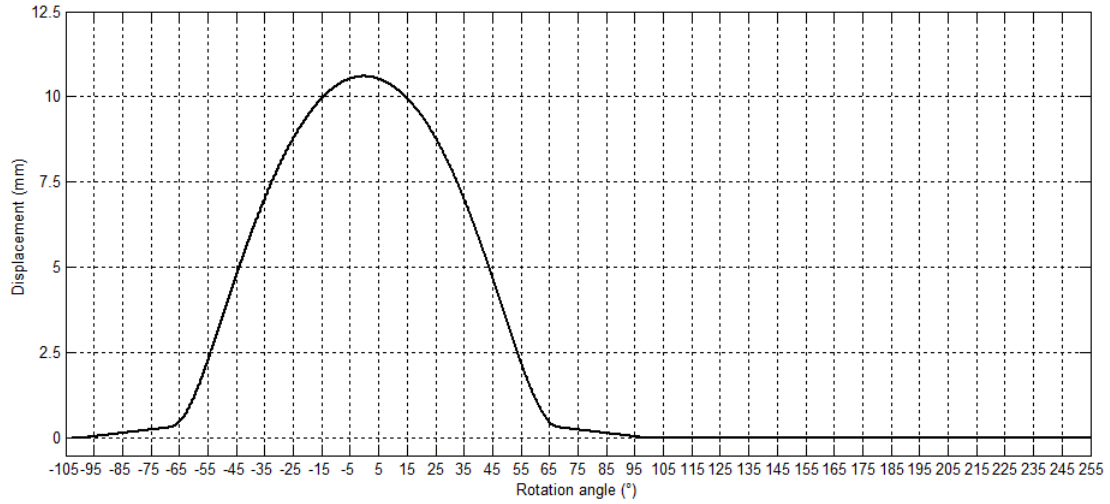


Figura 4.10: Andamento dell'alzata in direzione z, in funzione della coordinata angolare.

In particolare viene riportato un ingrandimento della zona in cui l'andamento della legge di alzata diventa lineare, in Figura 4.11, relativamente al settore angolare tra  $-105^\circ$  e  $-60^\circ$  circa, in modo da renderlo maggiormente chiaro, e da evidenziare anche il raccordo per il passaggio al successivo andamento curvilineo.

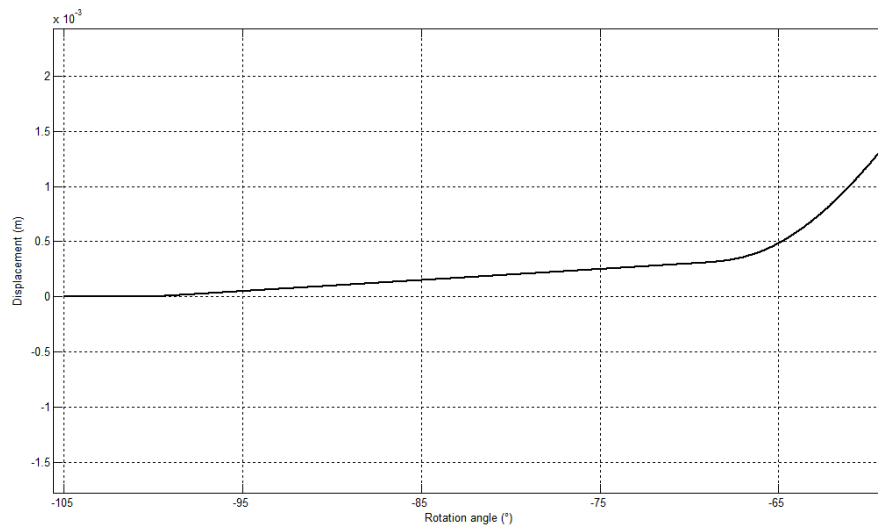
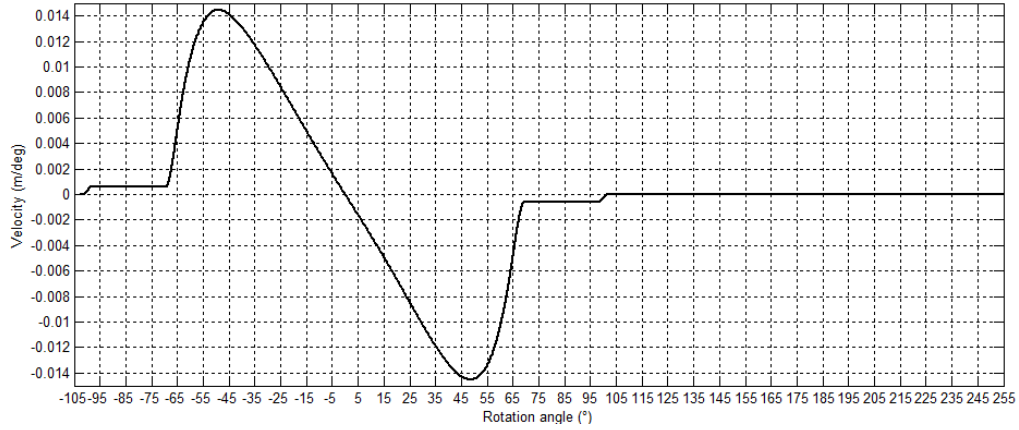


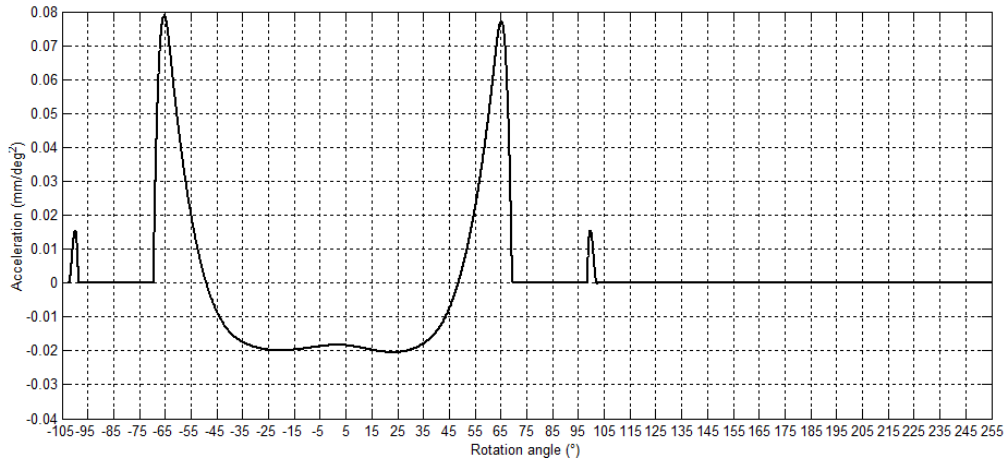
Figura 4.11: Ingrandimento della zona in cui l'alzata assume legge lineare.

Infine vengono riportati gli andamenti della velocità (Figura 4.12(a)) e dell'accelerazione (Figura 4.12(b)) del contatto in direzione z, in funzione della coordinata angolare, comple-

tando la cinematica del moto lungo  $z$ , e mostrando come in direzione  $z$  la velocità abbia dei tratti costanti diversi da zero, dovuti all'alzata lineare, mentre l'accelerazione è zero così come sul cerchio base.



(a)



(b)

Figura 4.12: Andamenti della legge di velocità (a) e accelerazione (b) lungo l'asse  $z$ , nelle rispettive posizioni angolari.

Per quanto riguarda il moto del punto di contatto, si ha, dalla cinematica, che la legge di spostamento e velocità del punto di contatto lungo l'asse  $x$ , hanno rispettivamente l'andamento della velocità e dell'accelerazione del moto in direzione  $z$ , tali andamenti vengono riportati in quanto necessari per gli studi sull'analisi delle immagini e per poter descrivere i posizionamenti impostati alla telecamera per riprendere i punti di maggior interesse, inoltre saranno una giustificazione ad alcuni problemi riscontrato nell'acquisizione delle immagini interferometriche.

In Figura 4.13(a) si ha lo spostamento del punto di contatto lungo  $x$ , mentre in Figura 4.13(b) si ha l'andamento della velocità in funzione della coordinata angolare, da queste figure viene confermata l'analogia con la velocità e accelerazione in direzione  $z$ , e in

particolare si notano zone diverse dal cerchio base in cui il contatto è fermo in direzione x mentre si muove in z.

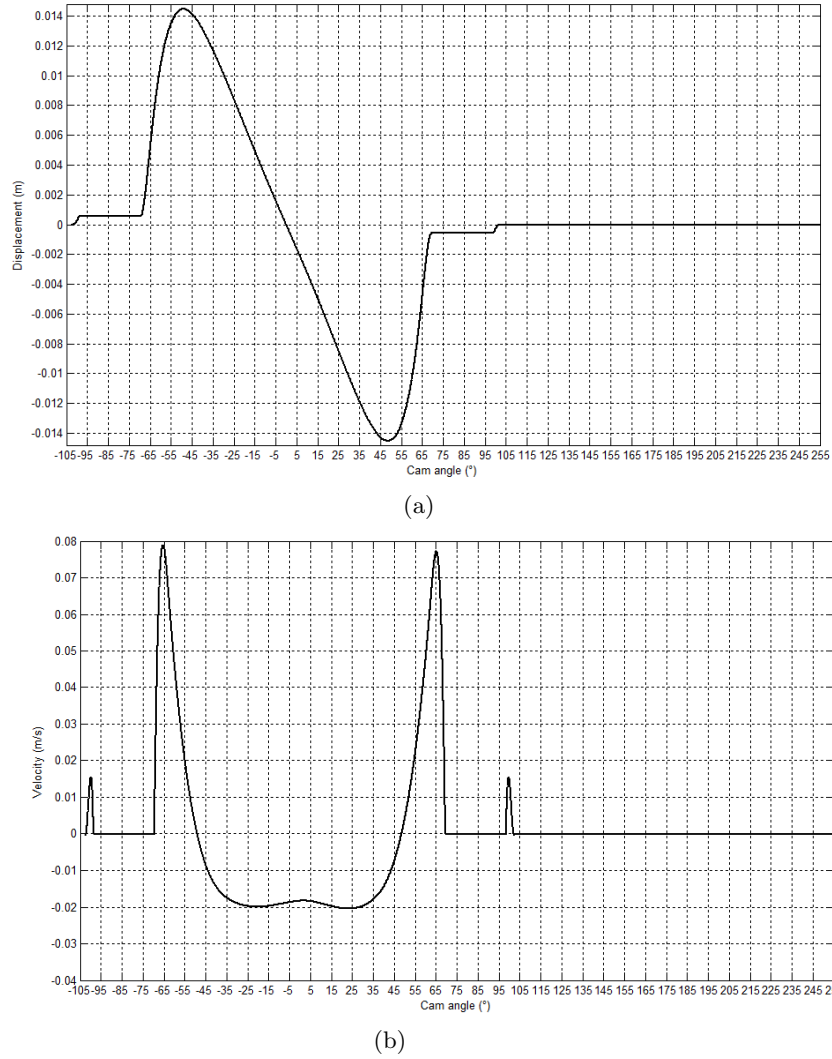


Figura 4.13: Andamenti della legge di spostamento (a) e velocità (b) del punto di contatto lungo l'asse x, nelle rispettive posizioni angolari.

È importante osservare come durante lo spostamento del punto di contatto lungo l'asse x (Figura 4.13(a)), ci sono dei settori angolari in cui il contatto rimane fermo lungo x in più di una posizione angolare, tali settori sono il cerchio base, in cui anche lungo z non si ha traslazione, e i settori angolari in cui l'alzata risulta lineare (Figura ??), cioè tra  $-100^\circ$  e  $-70^\circ$  e tra  $70^\circ$  e  $100^\circ$  circa. Avendo a disposizione la velocità di rotazione e di strisciamento, è possibile ottenere l'andamento dello slide to roll ratio S, in funzione della coordinata angolare (Figura 4.14). Il valore di S è dato da

$$S = \frac{\text{velocità di scorrimento}}{\text{velocità di rotolamento}} \quad (4.1)$$



In cui velocità di scorrimento corrisponde alla differenza tra le velocità dei due corpi, mentre la velocità di rotolamento è data dalla semisomma delle velocità dei due corpi nel punto di contatto relativamente al punto di contatto. Si nota un asintoto in corrispondenza dei punti in cui la velocità di rotolamento diventa nulla

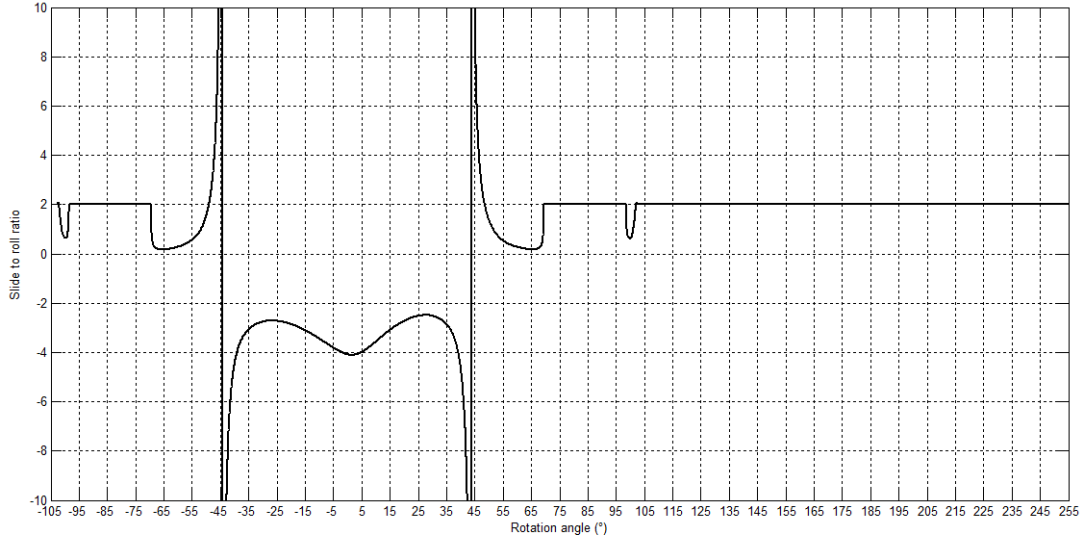


Figura 4.14: Andamento dello slide to roll ratio nelle rispettive coordinate angolari.

#### 4.2.2 Proprietà del lubrificante utilizzato

L'olio utilizzato è il SAE5W-40, e per valutarne la viscosità, viene utilizzata la formula di Roelands

$$\eta_0[Pa\cdot s] = 6,3 \cdot 10^5 \cdot 10^{4,060 \cdot (1 + \frac{T}{135})^{-1,042}} \quad (4.2)$$

per il parametro di piezoviscosità è stata utilizzata la seguente formula

$$\alpha[m^2/N] = 10^{(-0,430 \cdot \log T - 7,043)} \quad (4.3)$$

La temperatura misurata nella prova con termo-coppia, risulta essere  $26.7^\circ C$  quindi si ottiene

- $\eta_0 = 0.145 [Pa\cdot s]$  ;
- $\alpha = 2.2 \cdot 10^{-8} [m^2/N]$  ;

### 4.3 Misura delle forze durante le prove

Durante lo svolgimento delle prove di movimento, sono state rilevate le forze e i momenti agenti, mediante l'attrezzatura dinamometrica dotata di celle di carico, disponibile e descritta in precedenza. Le forze principali caratterizzanti il moto della camma, sono

la forza normale  $F_z$ , la forza d'attrito  $F_x$  e il momento  $M_y$  prodotto dalla forza normale e da quella di attrito, le altre componenti di forza e momenti non risultano rilevanti nel meccanismo e perciò vengono trascurate.

Queste forze vengono riportate di seguito e analizzate, relativamente a un giro della camma, estrapolato dai dati totali sapendo la frequenza di campionamento. Sulle forze campionate, viene inoltre applicato un filtro di Butterworth, secondo il procedimento utilizzato anche in [21], in quanto il segnale delle forze è disturbato dal sistema epicicloidale di trasmissione del moto, formato da ruote con numero di denti pari e multipli tra loro: 40 e 16, tale effetto aumenta all'aumentare della velocità, inoltre mediante filtraggio vengono anche eliminati i disturbi elettronici, che comunque sono molto piccoli.

Le caratteristiche dell'operazione di filtraggio sono riportate nella Tabella 4.4 e gli andamenti degli spettri di ognuna delle componenti, sono riportati in Appendice B.

Componente	Ordine del filtro	Frequenza di taglio [Hz]
$F_x$	5	10
$F_z$	5	10
$M_y$	5	5

Tabella 4.1: Valori delle frequenze di taglio applicate alle forze  $F_x$  e  $F_z$  e al momento  $M_y$ .

Nella Figura 4.15 viene riportato l'andamento della forza normale  $F_z$ , da cui emerge come grazie al precarico utilizzato non ci siano distacchi della camma dal disco, e si sia riusciti a stare lontani dallo zero.

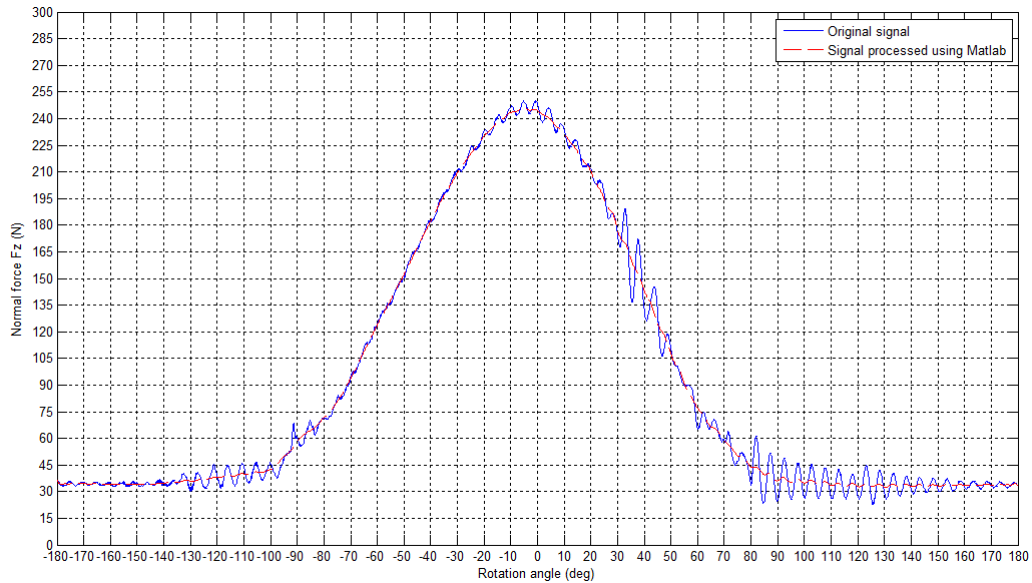


Figura 4.15: Forza normale  $F_z$ , in funzione della coordinata angolare.

I valori della forza normale, associati a ogni posizione angolare, verranno utilizzati tra gli input necessari per l'analisi delle immagini.

In Figura 4.16 viene riportato l'andamento della forza d'attrito  $F_x$ , la quale mostra un picco di valore positivo in corrispondenza di circa  $-90^\circ$ , dopo di che il valore assume valori negativi.

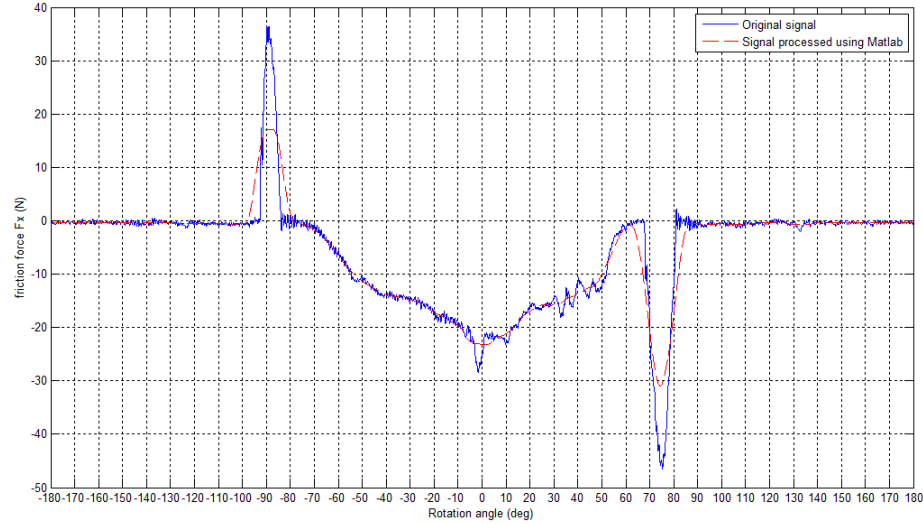


Figura 4.16: Forza d'attrito  $F_x$  in funzione della coordinata angolare.

La Figura 4.17, mostra il momento  $M_y$  in funzione della coordinata angolare.

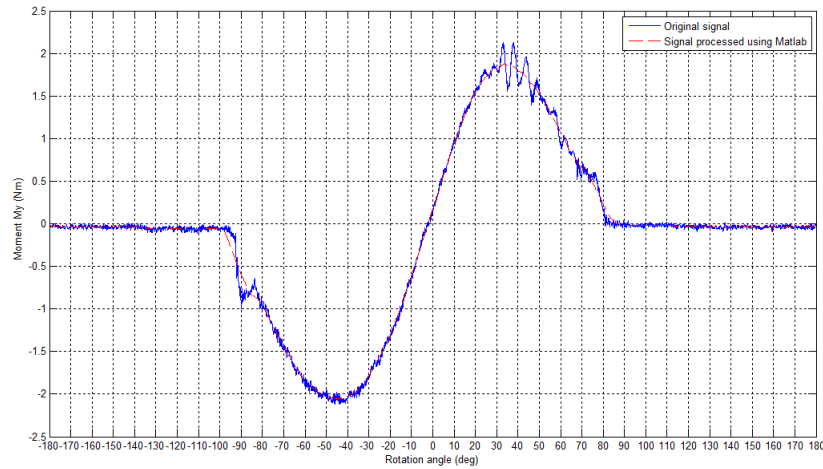


Figura 4.17: Momento  $M_y$ , in funzione della coordinata angolare.

Da tale andamento emerge come in corrispondenza di circa  $-88^\circ$ , in cui si ha il picco positivo della forza d'attrito, ci sia una deviazione dall'andamento quasi sinusoidale del momento, che comunque non cambia segno.

L'andamento del momento  $M_y$ , assume valori negativi fino a poco meno di  $0^\circ$ , di conseguenza non è del tutto simmetrico a causa dei differenti contributi delle forze normale e di attrito, riscontrato anche in [3].

Da  $-180^\circ$  fino a  $0^\circ$  la forza normale provoca un momento negativo, mentre da  $0^\circ$  a  $+180^\circ$  contribuisce in modo positivo, la forza di attrito invece contribuisce solo in senso negativo.

#### 4.3.1 Dipendenza dell'indice di rifrazione dalla pressione

Con il variare della forza agente sul contatto, varia di conseguenza anche la pressione nel meato, perciò è necessario analizzare la variazione dell'indice di rifrazione con la pressione per tenerne eventualmente conto in caso di variazioni non trascurabili, in quanto si avrebbero delle differenze sulle misure delle altezze.

Con riferimento all'analisi svolta in [8] e in particolare a quella di [22] e [23], il legame tra l'indice di rifrazione e la pressione è riportato nella seguente formula

$$n(p, T) = \sqrt{\frac{2 \cdot k(T) \cdot \rho(p) + 1}{1 - k(T) \cdot \rho(p)}} \quad (4.4)$$

in cui la densità  $\rho$  varia con la pressione a partire dal valore  $\rho_0$  a temperatura ambiente, secondo la seguente relazione

$$\rho(p) = \rho_0 \cdot \left(1 + 0.6 \cdot \frac{p}{1 + 1.7 \cdot p}\right) \quad (4.5)$$

mentre la variazione della densità con la temperatura non viene riportata in quanto nelle prove è stata misurata una temperatura sempre intorno ai  $26^\circ C$  circa, perciò si può supporre trascurabile tale dipendenza.

Per quanto riguarda le variazioni dell'indice di rifrazione, viene di seguito riportata la sua variazione con la temperatura, a partire dal valore iniziale  $n_0=1.43$  circa, ricavato nel precedente capitolo, come valore a temperatura ambiente, questa dipendenza segue l'equazione

$$n_0(T) = n_0 - 0.00033 \cdot T \quad (4.6)$$

da cui si vede come la temperatura (in  $^\circ C$ ) incide sull'indice di rifrazione per valori dell'ordine dei millesimi. Infine il termine  $k(T)$  presente nella 4.4, è dato dalla seguente relazione.

$$k(T) = \frac{n_0(T)^2 - 1}{\rho_0 \cdot (n_0(T)^2 + 2)} \quad (4.7)$$

Si nota come non sia necessaria la conoscenza del valore di densità a temperatura ambiente in quanto viene semplificato nella moltiplicazione di  $k(T)$  con  $\rho(p)$ , quindi sapendo  $n_0 = 1.43$  si ottiene il seguente andamento dell'indice di rifrazione con la pressione (in Gpa), riportato in Figura 4.18

Sapendo che la massima forza normale nel contatto camma piattello vale 250 N, dalla precedente Figura 4.15, e avviene in corrispondenza del naso della camma in cui il raggio di curvatura vale circa 10 mm (Figura 4.8), dalla teoria di Hertz, si ricava una pressione massima di 0.27 Gpa, cui corrisponde un indice di rifrazione di circa 1.47, con una differenza sull'indice di rifrazione di  $\delta n = 0.04$ , il quale provoca una variazione di altezza  $\delta h$  rispetto a quella prevista con  $n_0$ , il cui errore percentuale segue la seguente legge, dimostrata in [22] per la differenza tra l'altezza misurata con  $n_0$  e quella misurata in seguita alla variazione dell'indice di rifrazione

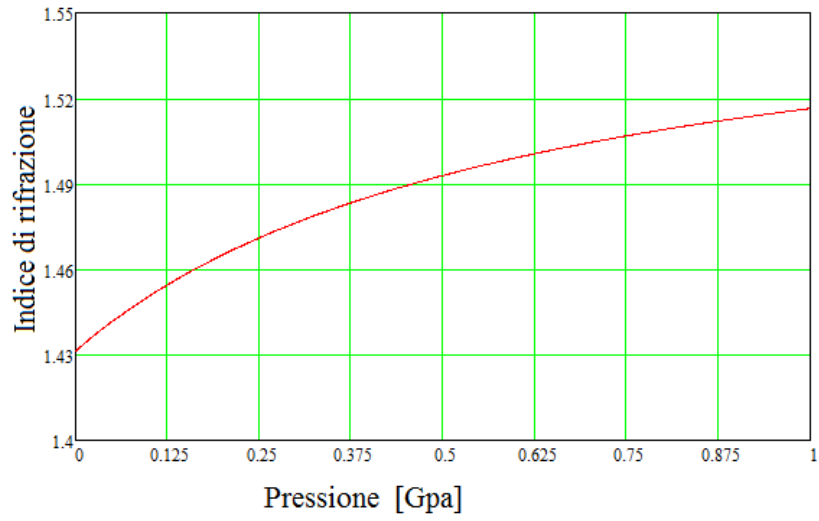


Figura 4.18: Variazione dell'indice di rifrazione con la pressione.

$$Errore = \frac{\delta h}{h} \cdot 100 = \frac{\delta n}{n_0} \cdot 100 \quad (4.8)$$

l'andamento di questo errore viene graficato in Figura 4.19 in funzione della pressione, da cui si vede come con i valori di pressione ottenuti in queste prove l'errore ottenuto sia dell'ordine del 4% circa, quindi ben trascurabile, permettendo nelle successive analisi di evitare correzioni dovute alla variazione di  $n$ .

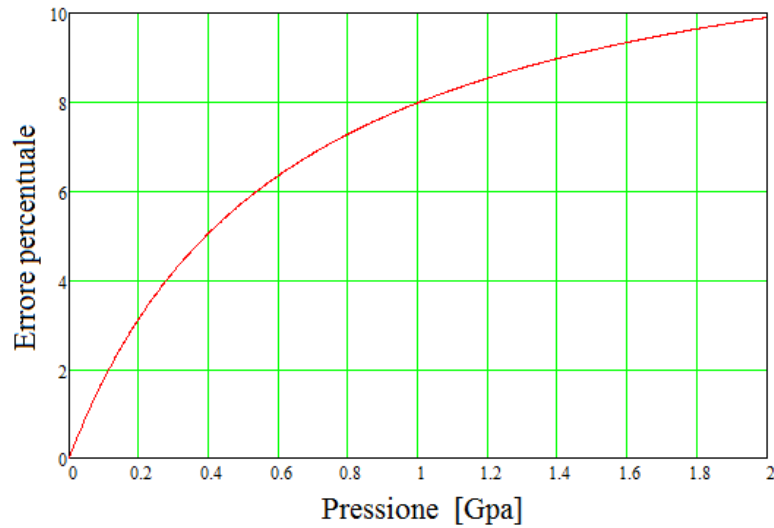


Figura 4.19: Variazione dell'errore percentuale con la pressione.

Come ulteriore legame in Figura 4.20, viene riportato l'errore percentuale, commesso nel supporre l'indice di rifrazione costante e uguale a  $n_0$ , in funzione della variazione dell'in-

dice di rifrazione stesso rispetto al valore iniziale  $n_0$ , e l'andamento diventa ovviamente rettilineo, dato dalla 4.8.

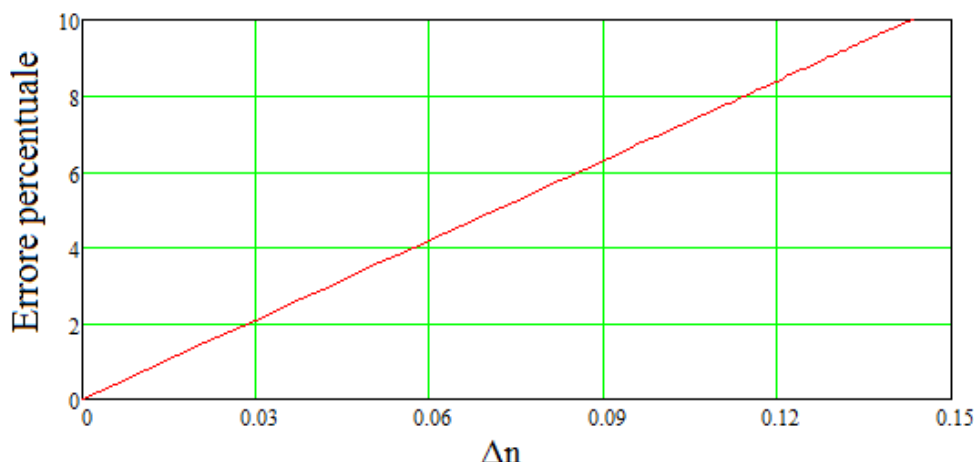


Figura 4.20: Variazione dell'errore percentuale con la variazione di indice di rifrazione.

La successiva analisi delle immagini, non necessita quindi di nessuna correzione dei valori delle altezze in seguito a differenze dell'indice di rifrazione, e può quindi essere utilizzata la tavola di calibrazione ottenuta nel capitolo precedente a pressione ambiente.

#### 4.4 Immagini interferometriche nelle posizioni significative e risultati dell'analisi

Le immagini acquisite mediante telecamera, vengono analizzate in questo paragrafo, con lo scopo di effettuare un successivo confronto tra i dati sperimentali e i dati ottenuti dalla teoria, inoltre con lo scopo di valutare il regime di lubrificazione del contatto, conoscendo la rugosità quadratica media del disco e della camma.

In particolare vengono riportate le immagini relative ad alcuni punti caratteristici del contatto, analizzati tramite lo script di Matlab sviluppato in questo lavoro, mentre i risultati ottenuti per gli altri punti saranno solamente riportati numericamente alla fine del capitolo per confrontarli con la teoria.

Le immagini analizzate vengono divise in base al posizionamento impostato alla telecamera lungo l'asse  $x$ , a partire dalla posizione zero che corrisponde al settor angolare del cerchio di base, fino agli estremi della corsa, in cui il moto si inverte. L'usura prodotta sul disco e la conseguente analisi del regime di lubrificazione, vengono riportati nel successivo capitolo.

Le immagini dei contatti utilizzate per l'analisi, vengono successivamente riportate parzialmente in modo da rientrare nei canoni delle figure del testo e in modo da essere sufficientemente visibili ed espressive per capire la condizione del contatto, comunque vengono riportate le dimensioni corrispondenti al contatto in modo da mantenere le proporzioni.

#### 4.4.1 Posizionamento sul cerchio di base

La prima zona della camma analizzata, è quella relativa al settore angolare del cerchio base, di circa  $165^\circ$ , in modo da avere il punto di contatto fermo per buona parte del tempo, al naso, e ai settori angolari in cui si ha alzata lineare (tra  $-100^\circ$  e  $-70^\circ$  e tra  $70^\circ$  e  $100^\circ$  circa), come mostrato in (Figura 4.13(a)), in quanto distanti meno di 1 mm dalla posizione di origine del contatto, tali punti sono importanti perchè mentre varia l'alzata su y, il contatto rimane fermo su x, perciò è possibile visualizzare molte immagini. Con riferimento ai grafici precedenti sulla cinematica della camma, e sulle forze agenti, viene analizzata una serie di immagini e i parametri da utilizzare come input dello script per l'analisi, sono riportati nella seguente Tabella 4.2

Posizione angolare $\phi$ [grad]	Velocità di entraining calcolata [m/s]	Fattore di scorrimento calcolato	Forza normale sperimentale [N]
-180	0.008	2	32
-170	0.008	2	32
-124	0.0081	2	36
-100	0.02	0.64	40
0	0.007	-4.11	250
-79	0.0085	2	73
+75	0.0085	2	55
+100	0.02	0.63	35

Tabella 4.2: Valori dei parametri caratterizzanti le posizioni di acquisizione delle immagini con il primo posizionamento.

Iniziando l'analisi con i punti relativi al cerchio base :  $-180^\circ$ ,  $-170^\circ$  e  $-124^\circ$ , in particolare con l'immagine relativa a  $-124^\circ$ , riportata in Figura 4.21, in cui si notano bene le frange colorate.

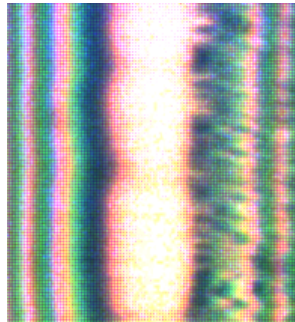


Figura 4.21: Immagine utilizzata per l'analisi interferometrica del punto a  $-124^\circ$ , riportata parzialmente in  $294 \times 318 \mu\text{m}$ .

Mediante lo script di analisi, si riesce ad ottenere il seguente profilo tridimensionale dell'altezza del meato nel contatto, riportato in Figura 4.22, da cui si riscontra la presenza della zona deformata tipica dei profili elastoidrodinamici, dal lato opposto in cui entra l'olio,

come previsto dalla teoria, si ricorda inoltre che in questo caso la velocità di entraining è positiva e quindi concorde con l'asse x.

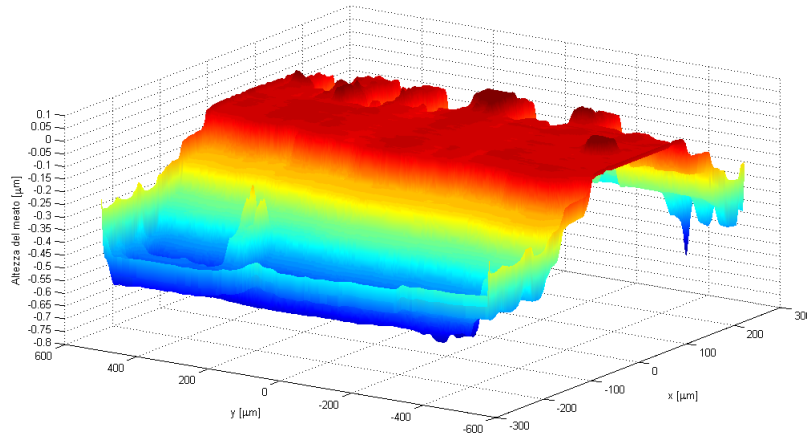


Figura 4.22: Profilo tridimensionale del meato in corrispondenza del cerchio base.

da tale profilo si ottiene la sezione lungo l'asse x, in corrispondenza del centro di Figura 4.23

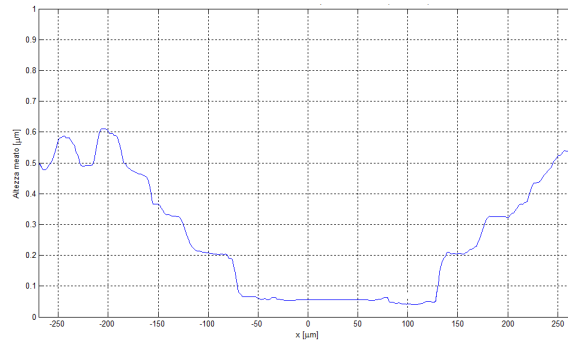


Figura 4.23: Sezione lungo l'asse x del profilo tridimensionale del meato, in posizione del centro.

da tale sezione si nota il profilo tipico dei contatti elastoidrodinamici di linea, non molto accentuato a causa delle piccole forze e velocità presenti.

Da questa analisi è stato possibile ottenere i seguenti valori di altezza minima e centrale

- altezza minima = 48 nm;
- altezza centrale = 63 nm;

mentre dalla teoria si ottiene 38 e 54 nm.

Successivamente al cerchio di base, viene svolta l'analisi delle immagini ottenute in corrispondenza dei punti in cui l'alzata ha legge lineare, in particolare vengono analizzati i punti a  $-100^\circ$  e  $-79^\circ$ .

Le figure dei contatti analizzate sono riportate in Figura 4.24(a) e in Figura 4.24(b),



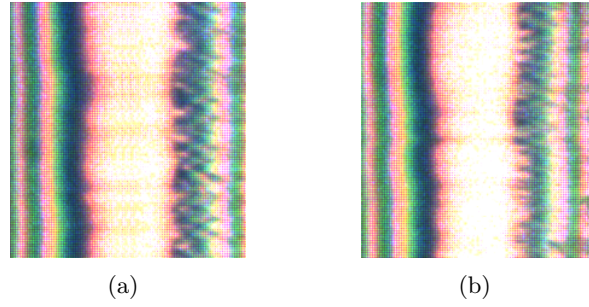


Figura 4.24: Immagini utilizzate nell'analisi interferometrica dei punti a  $-100^\circ$  (a) e  $-79^\circ$  (b), riportate parzialmente per  $294 \times 318 \mu\text{m}$ .

vengono riportate di seguito le immagini relative ai profili tridimensionali ottenuti dall'analisi delle immagini precedenti, in Figura 4.25(a) per  $-100^\circ$  e in Figura 4.25(b) per  $-79^\circ$

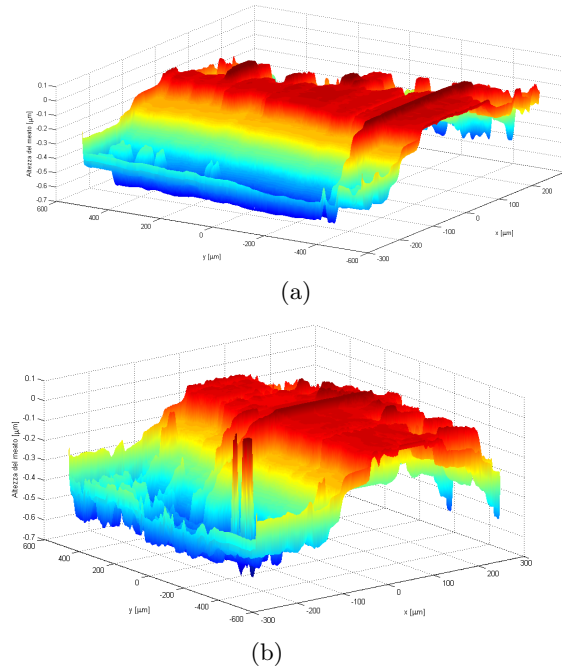


Figura 4.25: Profilo tridimensionale del meato in corrispondenza dei punti a  $-100^\circ$  (a) e  $-79^\circ$  (b).

Si nota come le immagini presentino dei disturbi, dovuti alla presenza di graffi e di macchie d'olio sul vetro, comunque si riesce a vedere che in alcune zone si forma il profilo tipico dei contatti elastoidrodinamici.

Da questi profili si ottiene le seguenti sezione lungo l'asse x, in corrispondenza del centro di ognuna, in modo da ossrevarne nel dettaglio il profilo.

Tali figure sono mostrate in Figura 4.26(a) per  $i = -100^\circ$  e in Figura 4.26(b) per  $i = -79^\circ$ .

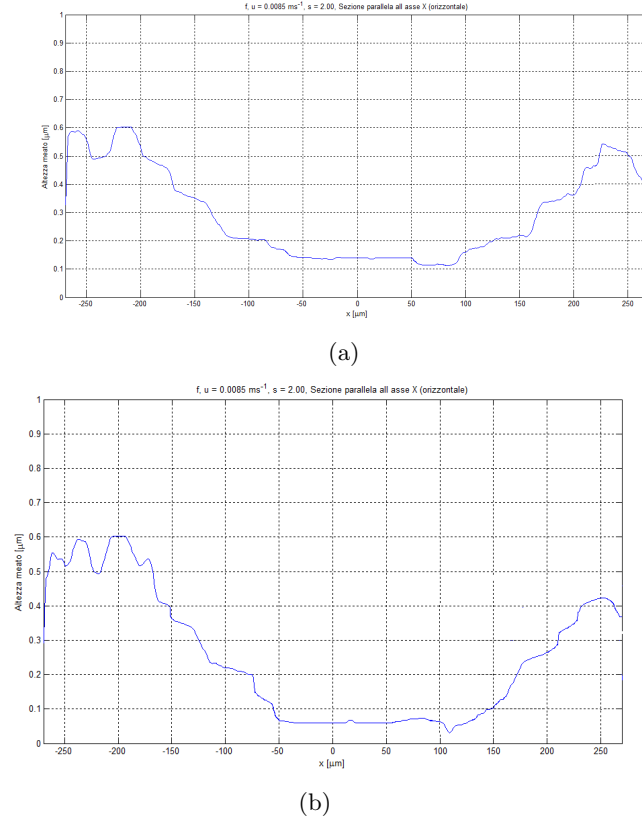


Figura 4.26: Sezione lungo l'asse x del profilo tridimensionale del meato, in posizione del centro in corrispondenza dei punti a  $-100^\circ$  (a) e  $-79^\circ$  (b).

Le sezioni dei profili tridimensionali mettono in evidenza gli effetti dovuti alle diverse forze e velocità, in particolare, nella posizione angolare  $-79^\circ$  si ha la maggior forza e si nota il restringimento del profilo deformato, mentre a  $-100^\circ$  si ha meno forza e più velocità, infatti le altezze sono maggiori, quest'ultimo punto infatti è molto importante in quanto mette in evidenza una maggior differenza rispetto all'analisi teorica.

Da questa analisi è stato possibile ottenere i seguenti valori di altezza minima e centrale

- a  $-100^\circ$ : altezza minima = 115 nm ; altezza centrale = 149 nm;
- a  $-79^\circ$ : altezza minima = 40 nm ; altezza centrale = 55 nm;

mentre dalla teoria si ottiene 90 e 128 nm per  $-100^\circ$ , 37 e 50 nm per  $-79^\circ$ .

Successivamente a questi punti, vengono descritti i punti corrispondenti alle posizioni angolari di  $75^\circ$  e  $100^\circ$ , in quanto altri punti di interesse, come quelli in cui si ha l'improvvisa inversione del moto, che avviene tra  $-93^\circ$  e  $-91^\circ$  circa, sono senza frange analizzabili, a causa dell'improvvisa traslazione.

In particolare il punto a  $100^\circ$  è di maggior interesse perché caratterizzato da grande velocità e raggio di curvatura, in presenza di una forza bassa, così come visto per il punto

simmetrico a  $-100^\circ$ .

Le figure del contatto utilizzate per l'analisi sono riportate rispettivamente in Figura 4.27(a) per  $75^\circ$  e in Figura 4.27(b) per  $100^\circ$ , ridotte per motivi di spazio, ma comunque adatte a mettere in luce le differenze dovute alle condizioni di carico, raggio di curvatura e velocità presenti nei due casi, nella seconda inoltre si nota la presenza di un graffio, che sarà presente anche nell'analisi tridimensionale.

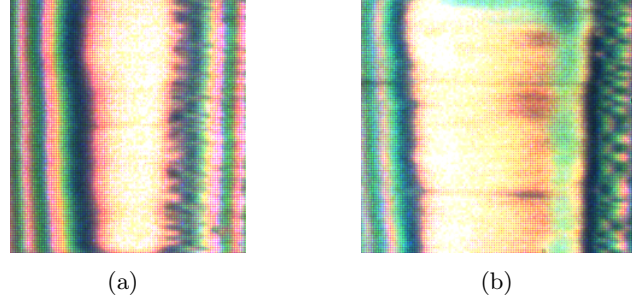


Figura 4.27: Immagini utilizzate per l'analisi interferometrica dei punti a  $75^\circ$  (a), riportata parzialmente in  $294 \times 318 \mu\text{m}$ , e  $100^\circ$  (b)  $350 \times 318$ .

Dall'analisi delle immagini, si ottiene i seguenti profili tridimensionali del meato, riportati in successione, a partire dalla Figura 4.28 in cui si ha il profilo del meato per il punto a  $75^\circ$ , che risulta molto simile al precedente a  $-79^\circ$ .

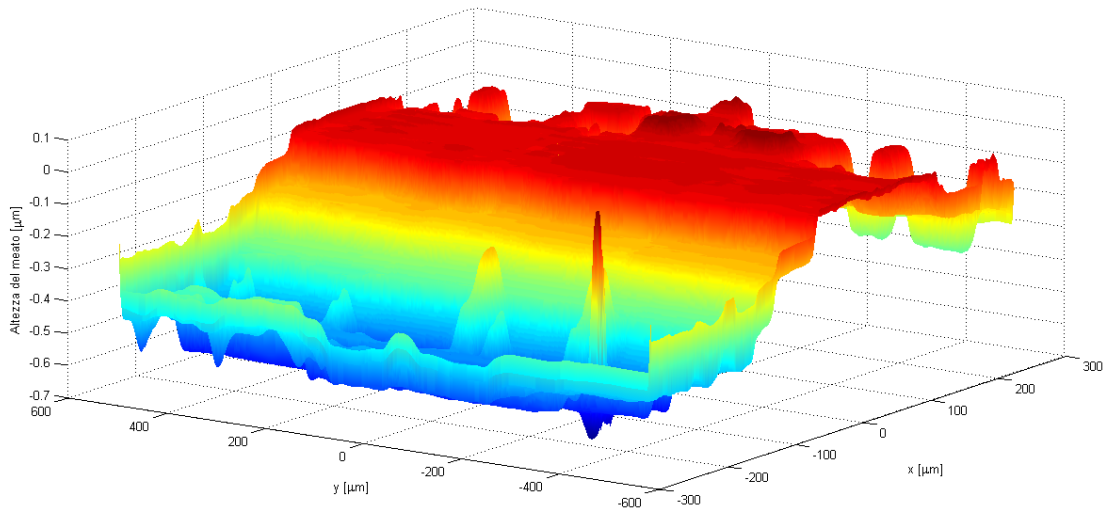


Figura 4.28: Profilo tridimensionale del meato nel punto a  $75^\circ$ .

Da questo profilo del meato si nota la presenza del profilo deformato nella zona d'uscita dell'olio, ancora dalla stessa parte delle immagini precedenti, in quanto la velocità di entraining è positiva, si nota poi la presenza di alcuni picchi dovuti a errori causati dalla presenza di macchie d'olio o di graffi sul disco.

La sezione lungo l'asse x, effettuata in corrispondenza della sezione centrale, viene riportata

in Figura 4.29, e si riesce a notare ancora il tipico profilo elastoidrodinamico, ancora dalla stessa parte in quanto la  $u$  ha ancora stesso verso.

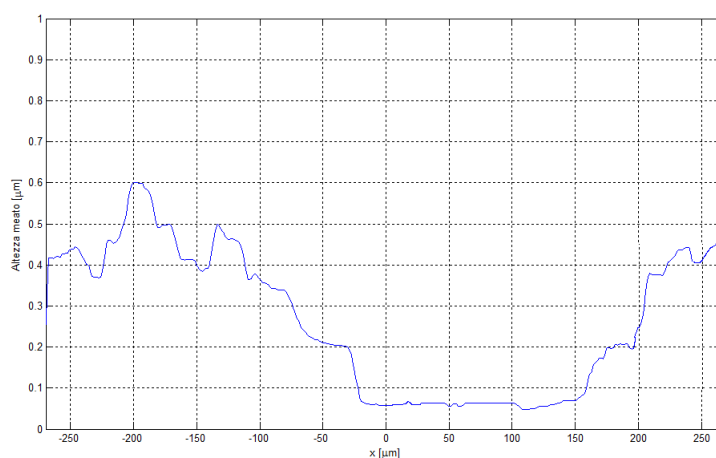


Figura 4.29: Sezione lungo l'asse  $x$  del profilo tridimensionale del meato, in posizione del centro in corrispondenza del punto a  $75^\circ$ .

In Figura 4.30 viene riportato il profilo tridimensionale per la coordinata angolare a  $100^\circ$ , il quale è particolarmente ben definito e permette di vedere bene il profilo deformato, si nota inoltre una sorta di taglio, dovuto alla presenza di un graffio sul vetro del disco.

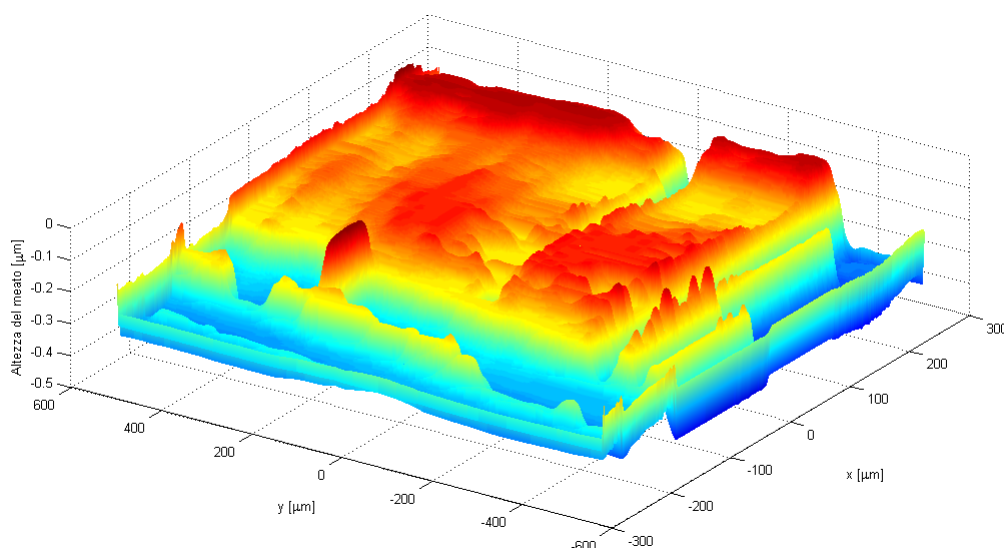


Figura 4.30: Profilo tridimensionale del meato nel punto a  $100^\circ$ .

In Figura 4.31 viene riportata la sezione lungo l'asse  $x$  del precedente profilo tridimensionale, in corrispondenza della sezione centrale per la coordinata angolare a  $100^\circ$ , da cui si nota un notevole aumento dell'altezza del contatto, sia minima che centrale, dovuta soprattutto all'alta velocità di entraining, ancora positiva, inoltre si ottiene una quasi sim-

metria con l'opposto angolo a  $-100^\circ$ , in cui le altezze sono leggermente inferiori a causa di un carico poco maggiore.

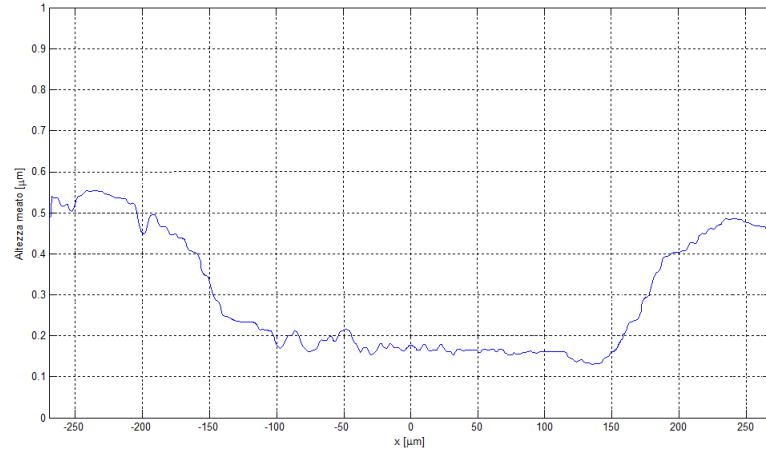


Figura 4.31: Sezione lungo l'asse x del profilo tridimensionale del meato, in posizione del centro in corrispondenza del punto a  $100^\circ$ .

Emerge in maniera particolare il profilo molto alto di Figura 4.31, in cui si ha una velocità molto alta, con maggior raggio di curvatura della Figura 4.29 e forza minore, di conseguenza le altezze ottenute sono ben maggiori. Si nota inoltre che si ottengono circa gli stessi valori del simmetrico a  $-100^\circ$  in cui si hanno gli stessi parametri, ma una forza leggermente superiore.

- a  $+75^\circ$ : altezza minima = 42 nm ; altezza centrale = 58 nm;
- a  $+100^\circ$ : altezza minima = 118 nm ; altezza centrale = 155 nm;

mentre dalla teoria si ottiene 38 e 52 nm per  $+75^\circ$  e 92 e 130 nm per  $+100^\circ$ . In corrispondenza di  $+75^\circ$ , si ha anche il picco della forza d'attrito, di circa 45 N, con un coefficiente d'attrito di circa 0.6, i danni provocati da questi valori, sono ben visibili in Appendice B. Con questo posizionamento assunto dalla telecamera, è possibile coprire soltanto circa 1 mm prima e dopo lo zero della corsa della camma, quindi successivamente ai punti di alzata lineare, non è possibile prendere immagini relative al fianco, il quale scatta via immediatamente appena raggiunto, quindi non è possibile da analizzare, ma nemmeno immagini sui punti di inversione che risultano distanti e richiedono un diverso posizionamento.

Uno strano effetto riscontrato nell'analisi delle immagini, e non possibile altrimenti, emerso anche in prove passate ([6]), e visibile in questo posizionamento soltanto, è il manifestarsi di una improvvisa e imprevista inversione del moto del punto di contatto, provocata dalla presenza di errori geometrici sul profilo della camma, dovuti probabilmente a errate lavorazioni della superficie della camma stessa, tali da provocare una brusca variazione del raggio di curvatura, che determini l'inversione. Tale inversione è molto rapida e il contatto riprende dopo pochi ms a muoversi nella direzione corretta.

Nella successiva sequenza di immagini Figura 4.32, è ben visibile tale inversione durante il moto del contatto da destra a sinistra, con una rotazione della camma discorde con l'asse



y, passando dal cerchio base alla zona di alzata lineare, l'improvvisa inversione dura solo 3 immagini (circa 6 ms) e successivamente il contatto riprende a muoversi nel verso corretto.

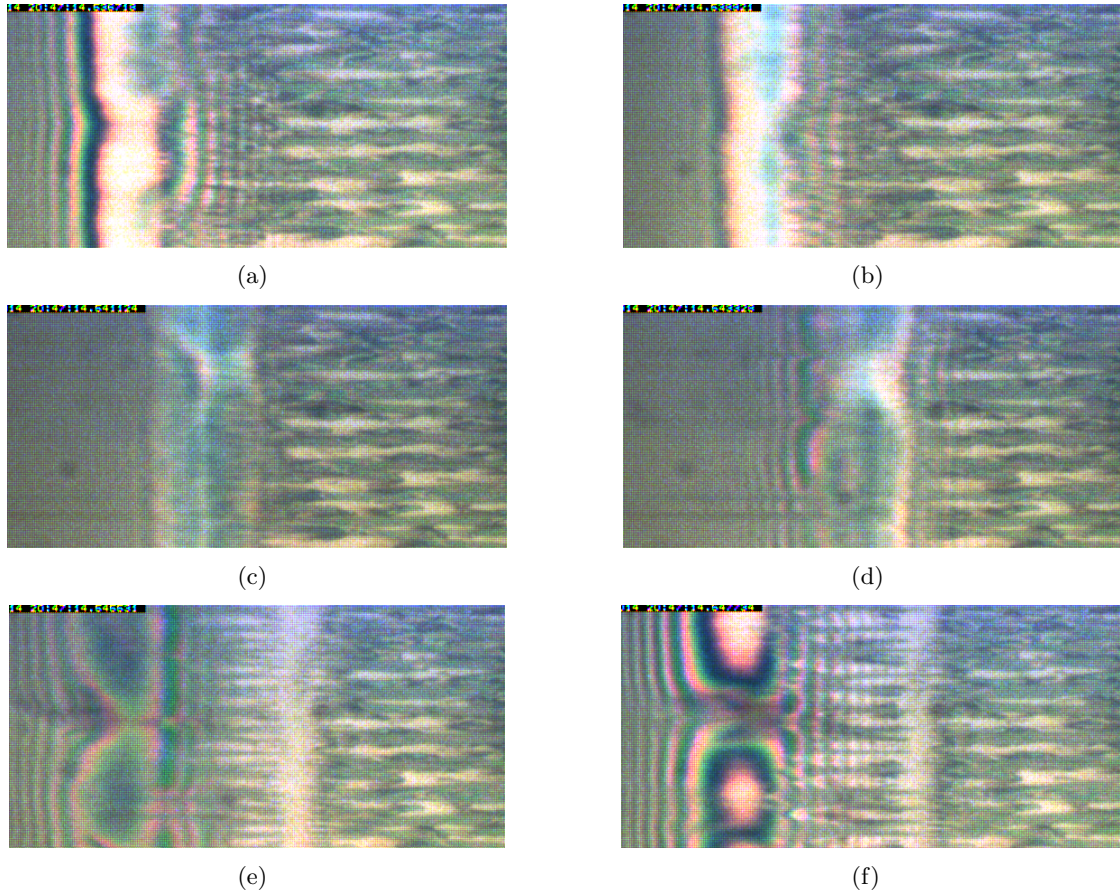


Figura 4.32: Sequenza dell'inversione del moto del contatto dovuta a errori geometrici sulla camma: il contatto si muove da destra a sinistra (a), si ha l'inversione improvvisa (b),(c),(d), poi il moto torna nel verso corretto(e),(f). Dimensioni immagini: 831x360  $\mu\text{m}$ .

Queste immagini, corrispondono alle posizioni angolari del passaggio da circa  $-93^\circ$  a circa  $-91^\circ$ , in corrispondenza del quale è stato misurato il picco della forza d'attrito in verso positivo (Figura 4.16) e una deviazione nell'andamento del momento  $M_y$  (Figura 4.17), ma da un punto di vista della teoria cinematica, coincide con una zona in cui le velocità risultano basse.

Questo comportamento avviene soltanto in corrispondenza del su detto settore angolare, e non nella parte simmetrica della corsa.

Per confermare la causa di natura geometrica, e non dovuta all'attrezzatura, è stata svolta una prova facendo ruotare la camma in senso opposto, ed è stato riscontrato il manifestarsi di questo comportamento in corrispondenza delle stesse coordinate angolari. Inoltre è stata svolta una prova utilizzando un'altra camma, dello stesso fornitore, e di stessa forma, e il problema non è comparso, confermando che la causa non è attribuibile all'attrezzatura.

Un'altra prova effettuata per controllare la natura geometrica del problema, è stata svolta

facendo ruotare la camma manualmente, quindi lentamente, in modo da poter notare come durante questo passaggio, la zona in contatto vari rapidamente assumendo valori anche grandi, dovuti a una brusca variazione del raggio di curvatura, come rappresentato nella sequenza di figure in Figura 4.33, da cui si vede bene anche la variazione di frange all'interno della stessa immagine, dovuta alla variazione del raggio di curvatura.

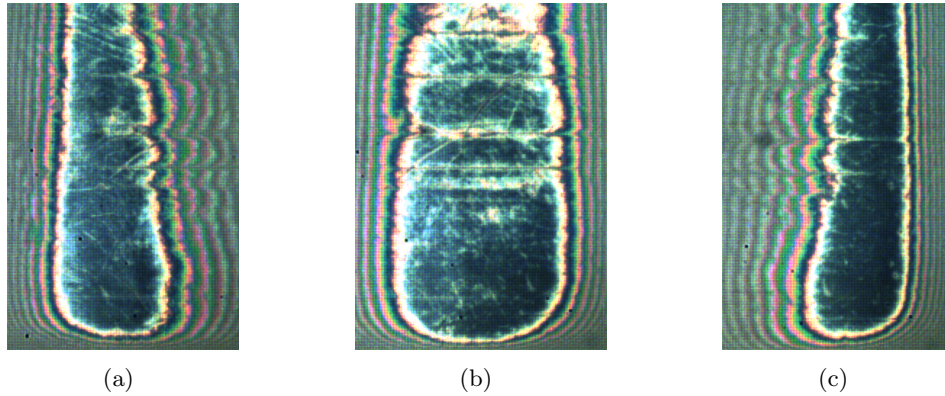


Figura 4.33: Sequenza dell'inversione del moto del contatto effettuata a mano: il contatto si muove da destra a sinistra, si ha l'inversione improvvisa e i raggi di curvatura crescono da (a) a (b) per poi ridurre in (c). Dimensioni immagini: 465x708  $\mu\text{m}$ .

Un altro problema successivo, riscontrato, è che in corrispondenza del passaggio del naso, è possibile ottenere delle immagini, ma a causa della velocità e dell'accelerazione del punto di contatto, e del molto olio trascinato, non si riesce a ottenere delle frange analizzabili, ma si vede soltanto una zona scura in movimento, mostrata in Figura 4.34

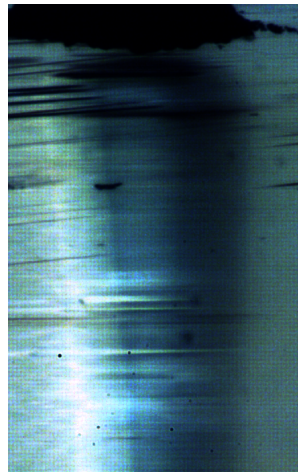


Figura 4.34: Immagine del naso della camma. Dimensione immagine: 676x1066  $\mu\text{m}$

Di conseguenza, dal programma vengono prese soltanto le altezze minima e centrale di 29 e 41 nm, mentre le teoriche sono 20 e 25 nm.

#### 4.4.2 Posizionamento sul punto di inversione in salita

Come secondo posizionamento della telecamera, viene scelto il punto di inversione del moto nella fase di salita della camma, cioè nella posizione +14.5 mm rispetto allo zero, come mostrato nella precedente Figura 4.13(a), in questo modo è stato possibile ottenere delle immagini relative al momento in cui il punto di contatto arriva, si ferma e inverte il suo moto. Il momento precedente all'azzeramento della velocità è mostrato in Figura 4.35(a), l'azzeramento della velocità del punto di contatto invece è mostrato in Figura 4.35(b), e nella Figura 4.35(c) invece si ha il momento in cui il contatto è ripartito con velocità negativa, inoltre si ha l'azzeramento della velocità di entraining.

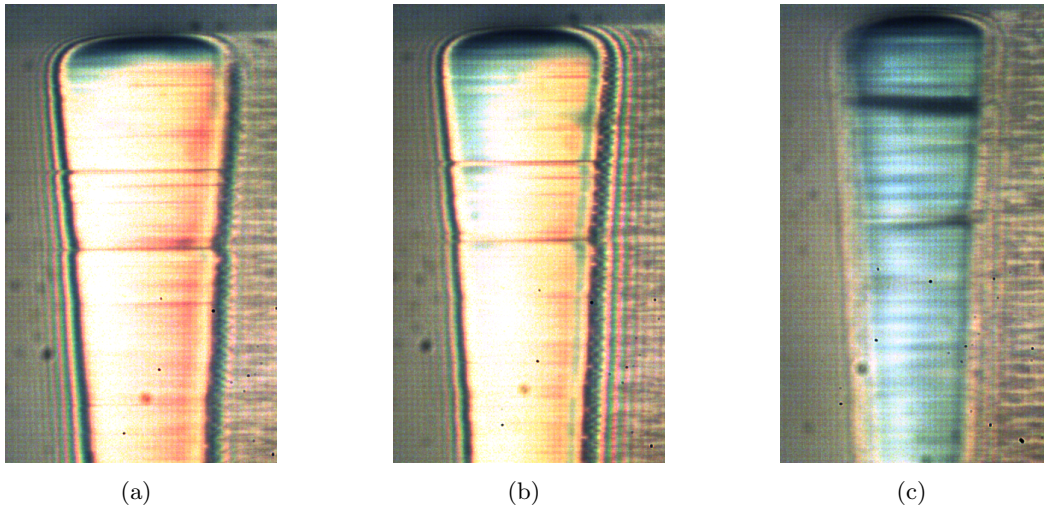


Figura 4.35: Immagine del punto di contatto precedente al momento di arresto della velocità in discesa (a), nel momento di arresto (b) e dopo l'arresto (c). Dimensioni immagini: 683x1147  $\mu\text{m}$ .

Queste figure corrispondono rispettivamente alle posizioni angolari di circa  $-51^\circ$ ,  $-49^\circ$  e  $-45^\circ$ . L'analisi interferometrica è stata svolta correttamente sulle prime due immagini, in quanto le frange sono ben visibili, mentre nella terza si ha molto sfocamento, dovuto alla velocità e all'accelerazione, l'analisi è stata svolta comunque, con lo scopo di ottenere i valori di altezza minima e centrale da confrontarsi con i dati teorici.

Nella seguente Tabella 4.3 vengono riportati i parametri necessari all'analisi, in relazione alle rispettive posizioni angolari.

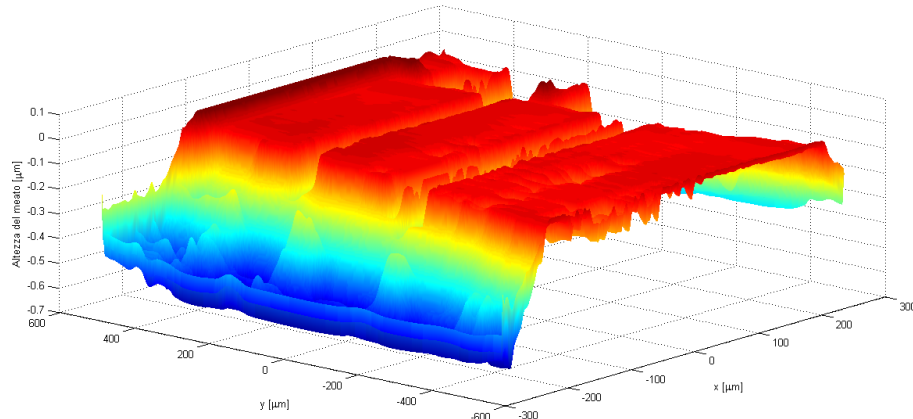
Posizione angolare $\phi$ [grad]	Velocità di entraining calcolata [m/s]	Fattore di scorrimento calcolato	Forza normale sperimentale [N]
-51	0.01	1.18	150
-49	0.0085	1.98	165
-45	0	inf	170

Tabella 4.3: Valori dei parametri caratterizzanti le posizioni di acquisizione delle immagini con il secondo posizionamento.

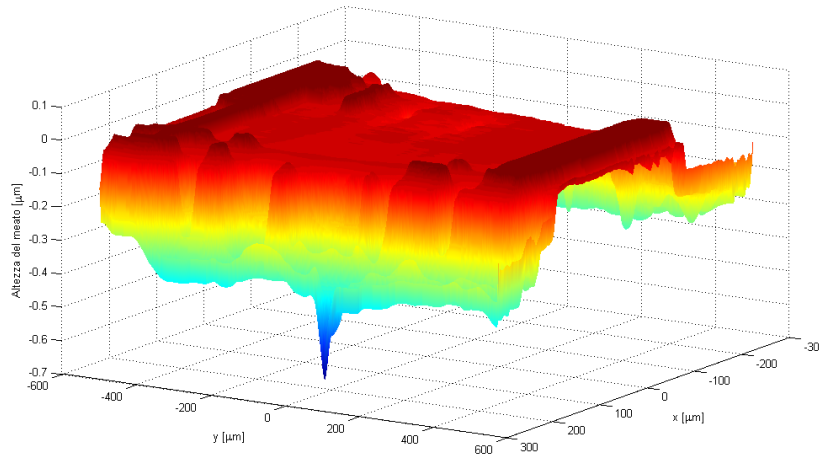


In queste coordinate angolari, la velocità di entraining decresce, così come il raggio di curvatura, fino ad annullarsi proprio in corrispondenza di  $-45^\circ$ , infatti si nota come la precedente Figura 4.35(c) sia molto scura, a causa dell'avvicinarsi dei due corpi, impedito dal fenomeno di squeeze; inoltre questa fase corrisponde alla zona in cui il momento  $M_y$  arriva ad assumere il massimo valore negativo e quindi resistente.

Inserendo i dati e le immagini nello script di analisi, si riesce a ottenere i seguenti profili tridimensionali di altezza del meato, riportati in Figura 4.36(a) per  $-51^\circ$  e Figura 4.36(b) per  $-49^\circ$



(a)

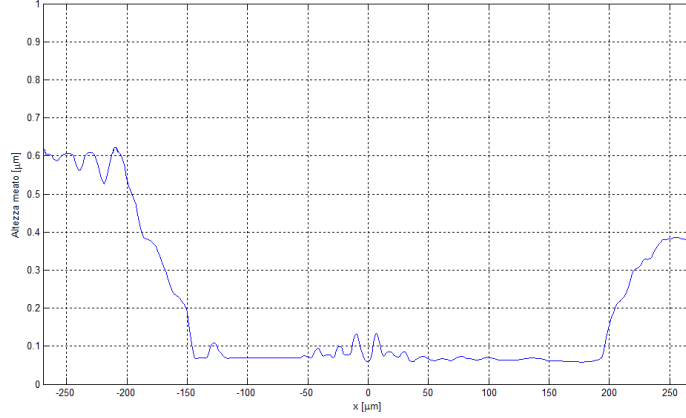


(b)

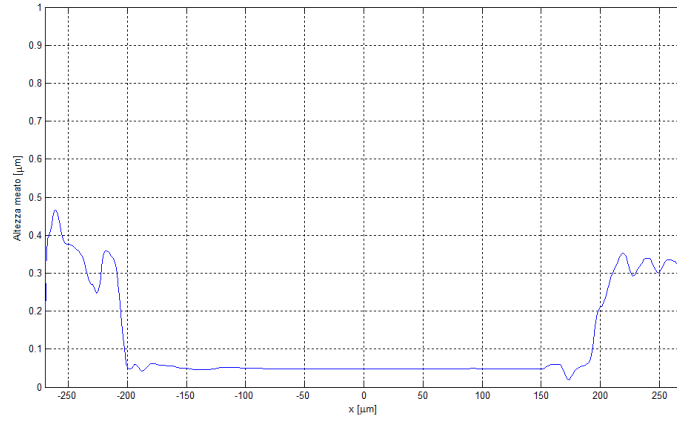
Figura 4.36: Profilo tridimensionale del meato in corrispondenza dei punti a  $-51^\circ$  (a) e  $-49^\circ$  (b).

particolarmente nella Figura 4.36(b) si notano i rilievi laterali tipici di contatti elastoidrodinamici, mentre nella prima si hanno più difetti dovuti anche al molto olio presente, in entrambe le immagini comunque si nota la presenza di una zona rialzata all'estremità, dovuta a errori geometrici della camma che provocano un carico maggiore nella zona estrema.

Per osservare nel dettaglio i profili del meato, a partire dai precedenti grafici tridimensionali si ottengono le seguenti sezioni lungo l'asse x, in corrispondenza del centro: Figura 4.37(a) per  $-51^\circ$  e Figura 4.37(b) per  $-49^\circ$



(a)



(b)

Figura 4.37: Sezione lungo l'asse x del profilo tridimensionale del meato, corrispondenza del punto a  $-51^\circ$  (a) e  $-49^\circ$  (b).

si riesce ancora a notare il profilo tipico dei contatti elastoidrodinamici di linea, disturbato dalla presenza di olio e graffi sul disco, inoltre sono ben visibili le differenze di pendenza del profilo, dovute alla variazione del raggio di curvatura, che provoca differenze nella larghezza delle frange, come mostrato nel capitolo precedente.

Successivamente è stata fatta l'analisi del punto a  $-45^\circ$ , in cui si annulla la velocità di entraining, e in cui la teoria darebbe dei risultati nulli per le altezze, questa immagine è particolarmente scura proprio per l'avvicinarsi dei corpi, e a causa delle velocità e accelerazione del punto di contatto, le frange sono molto sbiadite, perciò la successiva analisi viene riportata con lo scopo di ottenere le altezze minima e centrale calcolate dal programma, in quanto il profilo tridimensionale risulta molto disturbato.

Il profilo tridimensionale ottenuto dall'analisi è riportato in Figura 4.38, in cui si nota come a causa delle frange scolorite, tale profilo risulti molto piatto.

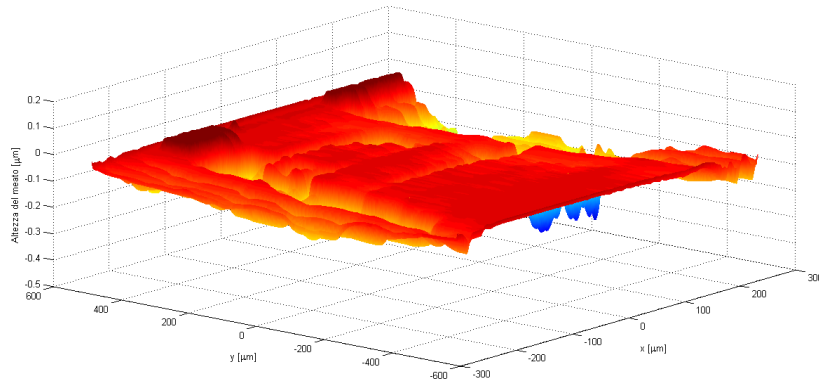


Figura 4.38: Profilo tridimensionale del meato nel punto di azzeramento della velocità di entraining in salita:  $-45^\circ$ .

Dalla sezione lungo l'asse x in corrispondenza della sezione centrale del precedente profilo tridimensionale, si ottiene il seguente profilo Figura 4.39

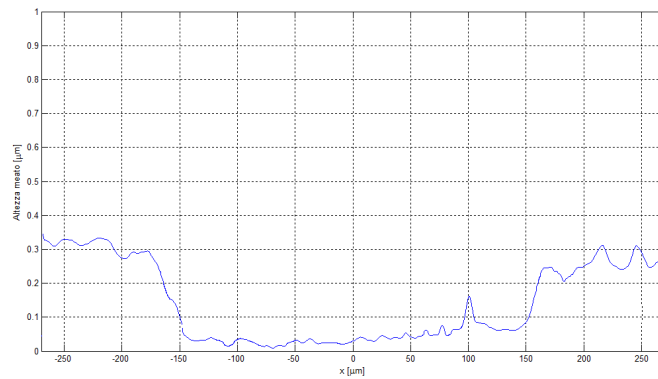


Figura 4.39: Sezione nel punto di azzeramento entraining in salita :  $-45^\circ$ .

Da questa analisi è stato possibile ottenere i seguenti valori di altezza minima e centrale

- a  $-51^\circ$ : altezza minima = 49 nm ; altezza centrale = 62 nm;
- a  $-49^\circ$ : altezza minima = 41 nm ; altezza centrale = 57 nm;
- a  $-45^\circ$ : altezza minima = 16 nm ; altezza centrale = 30 nm;

mentre dalla teoria si ottiene 43 e 57 nm per  $-51^\circ$ , 37 e 50 nm per  $-49^\circ$ , 0 e 0 per  $-45^\circ$ , mostrando come l'analisi compiuta dalla teoria non tenga conto dei fenomeni che avvengono in condizioni di transitorio come quelle di questa prova.

#### 4.4.3 Posizionamento sul punto di inversione in discesa

Il terzo posizionamento della telecamera, viene effettuato sul punto di inversione del moto del contatto nella fase di discesa della camma, cioè nella posizione -14.5 mm rispetto

allo zero, come mostrato nella precedente Figura 4.13(a), in questo modo è stato possibile ottenere delle immagini relative al momento in cui il punto di contatto arriva con velocità negativa, si ferma e inverte il suo moto.

Il momento precedente all'azzeramento della velocità è mostrato in Figura 4.40(a), che risulta molto scura, in quanto coincide all'incirca con la posizione in cui si annulla la velocità di entraining, l'azzeramento della velocità del punto di contatto invece è mostrato in Figura 4.40(b), e nella Figura 4.40(c) invece si ha il momento in cui il contatto riparte e la sua velocità cambia verso. Da notare sono le scie dovute al movimento dell'olio.

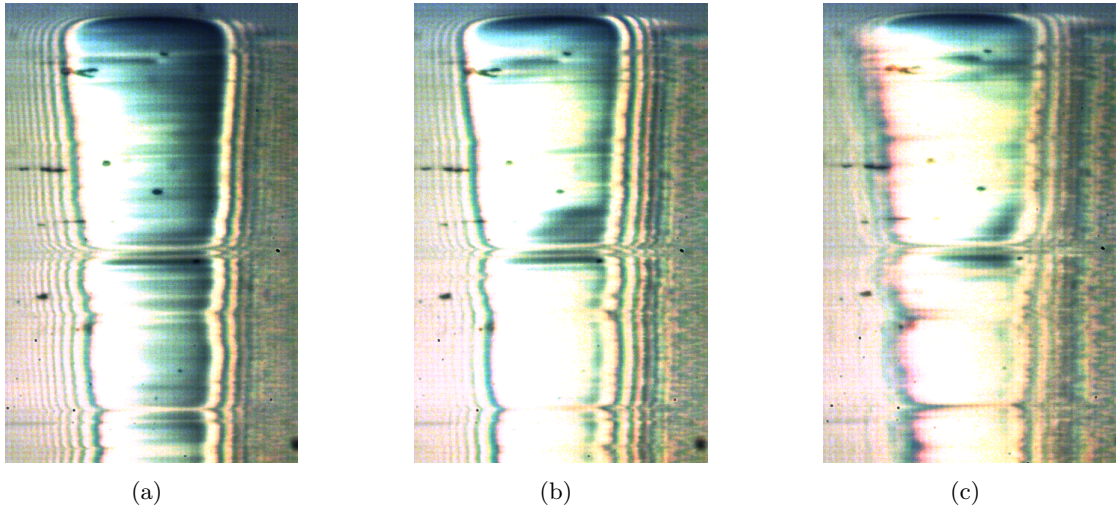


Figura 4.40: Immagine del punto di contatto precedente al momento di arresto della propria velocità in fase di discesa (a), nel momento di arresto (b) e dopo l'arresto (c). Dimensioni immagini: 733x1147  $\mu\text{m}$ .

Queste figure corrispondono rispettivamente alle posizioni angolari di circa  $+45^\circ$ ,  $+48^\circ$  e  $+50^\circ$ , in particolare, l'analisi interferometrica è stata svolta sulle prime due, in cui le frange hanno colori ben visibili, mentre nella terza si ha molto sfocamento, dovuto al cambio di velocità e all'accelerazione che spinge via la camma, impedendo l'analisi delle frange, che risultano deviate dal moto dell'olio.

Nella seguente Tabella 4.4 vengono riportati i parametri necessari all'analisi, misurati nelle rispettive posizioni angolari

Posizione angolare $\phi$ [grad]	Velocità di entraining calcolata [m/s]	Fattore di scorrimento calcolato	Forza normale sperimentale [N]
45	0	inf	120
48	0.008	2.31	115

Tabella 4.4: Valori dei parametri caratterizzanti le posizioni di acquisizione delle immagini con il terzo posizionamento.

Lo script di analisi permette di ottenere i profili tridimensionali di altezza del meato in

Figura 4.41(a) per  $45^\circ$  e Figura 4.41(b) per  $48^\circ$ .

Da questi profili si nota la differenza di deformazione dovuta al cambiamento del verso della velocità di entraining, in quanto a  $45^\circ$  si ha velocità negativa e praticamente nulla, e infatti il profilo deformato si trova sul lato opposto rispetto ai casi precedenti in cui la velocità di entraining era positiva, al momento dell'arresto poi i picchi iniziano a formarsi sull'altra estremità. In entrambi i casi, le immagini presentano dei disturbi dovuti al molto olio trascinato nel movimento e spinto nell'inversione, si nota anche una solca di solco, soprattutto in Figura 4.41(b), dovuto ai graffi formati sul disco, visibile nelle precedenti figure.

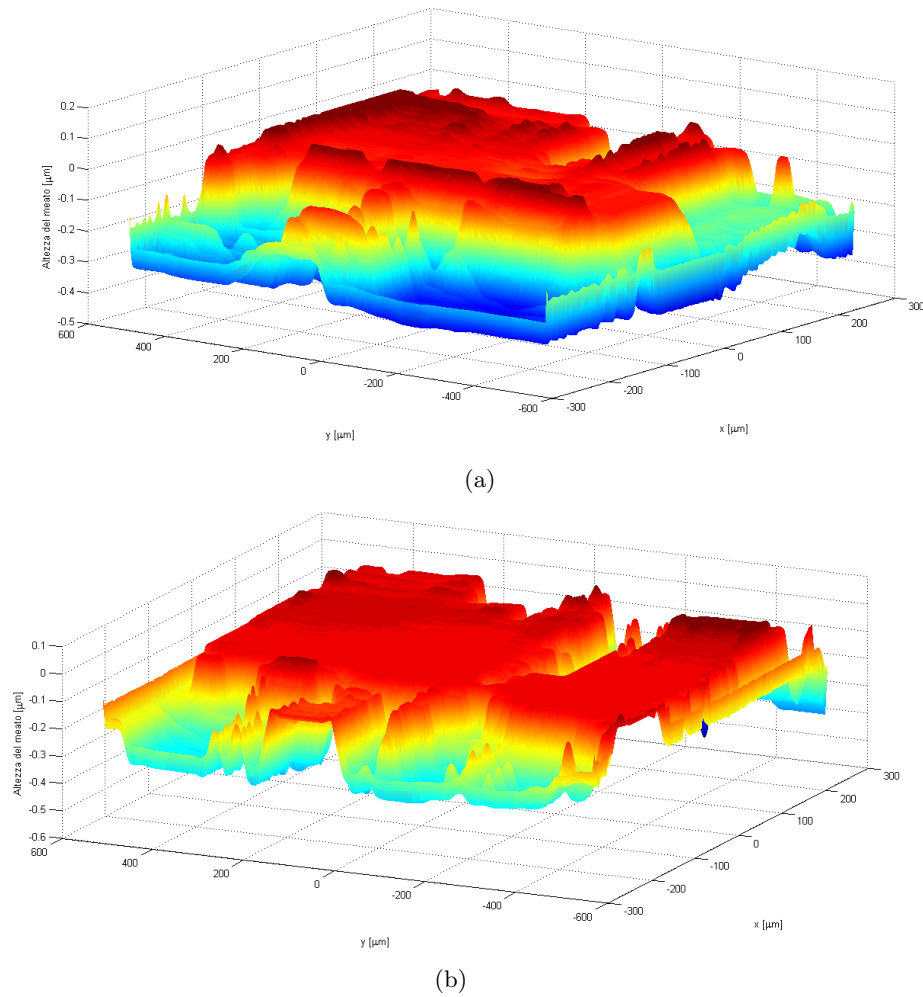
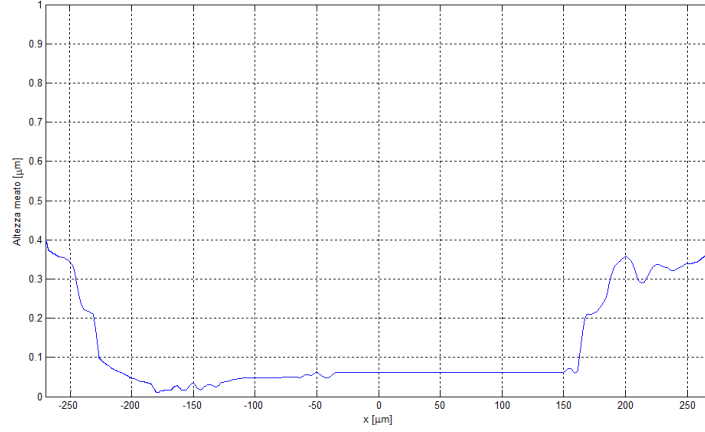


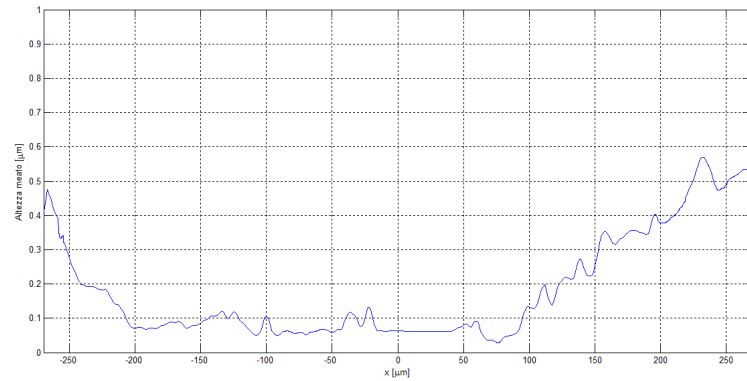
Figura 4.41: Profilo tridimensionale del meato in corrispondenza dei punti a  $+45^\circ$  (a) e  $+48^\circ$  (b).

da questi profili tridimensionali, si ottengono le seguenti sezioni lungo l'asse  $x$ , in corrispondenza del centro, mostrate in Figura 4.42(a) per  $+45^\circ$  e Figura 4.42(b) per  $+48^\circ$ . Queste sezioni, come nel caso precedente, mostrano due differenti pendenze laterali, dovute ai diversi raggi di curvatura della camma, inoltre confermano quanto detto in precedenza

sull'inversione del profilo deformato in seguito alla variazione di velocità di entraining, all'incirca in corrispondenza dei  $45^\circ$  tale velocità diventa nulla, per poi tornare in verso positivo e infatti in  $48^\circ$  si nota il profilo elastoidrodinamico dalla parte delle immagini precedenti, sempre presenti sono i disturbi, che in particolare nella seconda figura, impediscono il raggiungimento del fondo scala della tavola di calibrazione, arrestandosi a circa  $0.4 \mu m$ .



(a)



(b)

Figura 4.42: Sezione lungo l'asse x del profilo tridimensionale del meato, in corrispondenza dei punti a  $+45^\circ$  (a) e  $+48^\circ$  (b).

Da questa analisi è stato possibile ottenere i seguenti valori di altezza minima e centrale

- a  $45^\circ$ : altezza minima = 20 nm ; altezza centrale = 35 nm;
- a  $48^\circ$ : altezza minima = 41 nm ; altezza centrale = 55 nm;

mentre dalla teoria si ottiene 0 e 0 nm per  $45^\circ$ , 34 e 46 nm per  $48^\circ$ .

in particolare, occorre notare come in corrispondenza dell'angolo di  $45^\circ$ , in cui la velocità di entraining diventa nulla, i valori teorici sono nulli, mentre quelli ottenuti dall'analisi sono piuttosto distanti, dovuti ai fenomeni di squeeze, che impediscono al fluido di uscire

dal contatto. In corrispondenza dei  $45^\circ$  inoltre, a causa dell'annullamento della velocità di entraining, si ha l'asintoto del fattore di scorrimento, il quale tende a infinito, implicando che nel contatto si arriva ad avere strisciamento puro, infatti si hanno alta forza d'attrito (circa 18 N) e si presentano grossi segni d'usura sul disco, come riportato in Appendice B.

#### 4.4.4 Posizionamento sul punto di massima accelerazione in salita

Per osservare il punto in cui il contatto raggiunge la massima accelerazione durante la fase di salita della camma, la telecamera è stata posizionata a +4.5 mm dallo zero, in quanto la posizione di massima accelerazione viene raggiunta sul fianco, e in fase di salita, la camma si trova nella posizione angolare di  $-65.5^\circ$ , in cui la velocità di entraining il raggio di curvatura locale raggiungono i massimi valori.

Questo punto però è risultato non acquisibile dalla telecamera utilizzata, nemmeno utilizzando 1000 immagini al secondo. Le immagini acquisite riguardano il punto a  $-15^\circ$ , in cui comunque l'immagine risulta scura e senza frange come in Figura 4.43, ed è possibile notare, come successo anche con il naso.

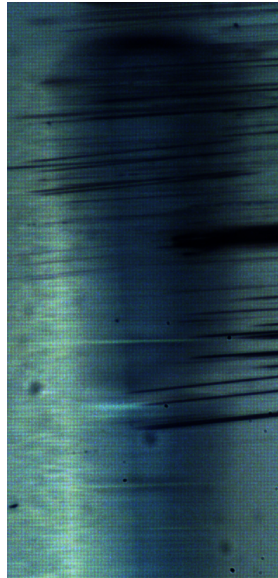


Figura 4.43: Immagine del punto di contatto sul fianco, in fase di salita. Dimensioni immagini:  $610 \times 1263 \mu\text{m}$ .

A causa dell'assenza di frange colorate, e a causa della presenza di graffi sul disco, l'analisi interferometrica non è stata possibile, ma è stata limitata al solo calcolo delle altezze minima e centrale da cui si è ottenuto 25 e 37 nm, rispetto ai 19 e 23 nm calcolati dalla teoria.



#### 4.4.5 Posizionamento sul punto di massima accelerazione in discesa

Anche durante la fase di discesa, sono stati fatti dei tentativi di ottenere il punto di contatto con la massima accelerazione. per fare ciò la telecamera è stata posizionata a -4.2 mm dallo zero, la camma si trova in posizione angolare di  $65^\circ$ . Ma anche in questo caso il punto desiderato non è stato possibile da acquisire, nemmeno con 1000 immagini/secondo. Sono state prese invece immagini relative alla posizione angolare di  $+15^\circ$  ed anche in questo caso l'immagine è risultata scura e senza frange come in Figura 4.44.

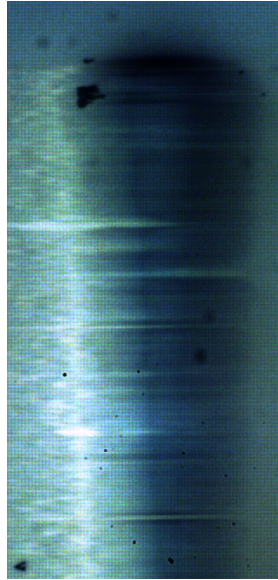


Figura 4.44: Immagine del punto di contatto sul fianco, in fase di discesa. Dimensioni immagini:  $610 \times 1263 \mu\text{m}$ .

Anche in questo caso non è stato possibile ottenere un'immagine analizzabile su tutto il profilo del meato, ma è stata svolta l'analisi limitatamente al calcolo delle altezze minima e centrale da cui si è ricavato 25 e 37 nm rispetto ai 18 e 22 nm teorici.

### 4.5 Problemi riscontrati

Alcuni dei problemi sono già stati descritti nei paragrafi precedenti, in particolare quelli relativi al sistema di movimento della telecamera, il quale permette una movimentazione esclusivamente incrementale, con velocità limitata tra i vari step, impedendo quindi l'acquisizione continua delle immagini contemporaneamente alla traslazione del punto di contatto, per questo è stato scelto di lasciare la telecamera ferma nelle varie posizioni impostate.

Sempre legato alla telecamera, è stato riscontrato il problema della memoria dati, in quanto corrisponde al massimo a 4 GB, e a causa del fatto che una singola immagine da  $1280 \times 1024$  pixel occupa circa 1.4 MB, il numero massimo è di 2860 immagini acquisibili. Tutto ciò implica limiti sulla frequenza di acquisizione delle immagini, che per poter garantire la ripresa del punto di contatto, è stata settata su 500 immagini al secondo, per un totale di



circa 5.6 s di movimento, mentre frequenze maggiori avrebbero ridotto il tempo di acquisizione facendo riscontrare meno dati, e frequenze minori avrebbero dato il rischio di non prendere le immagini nei momenti giusti. In ogni caso con le frequenze utilizzate di 500 e anche di 1000 immagini al secondo, non è stato possibile acquisire immagini relative ai punti di massima velocità del contatto.

Il contatto della camma con il disco avviene su una lunghezza di 8 mm, e come visto anche nel Capitolo 3, con il microscopio attuale si riesce a visualizzare soltanto una zona limitata ad alcuni mm, e ovviamente nemmeno tutta la corsa è visibile con un solo posizionamento della telecamera, in quanto richiede circa 29 mm. L'ingrandimento minimo raggiungibile per poter vedere bene i colori delle frange è il x3 (con il x2 fisso) mostrato in Figura 4.45, che corrisponde a circa 3 mm; riducendolo si hanno problemi di troppa luce non eliminabili, che impediscono la visione delle frange e mostrano ancora parzialmente il contatto e la corsa.

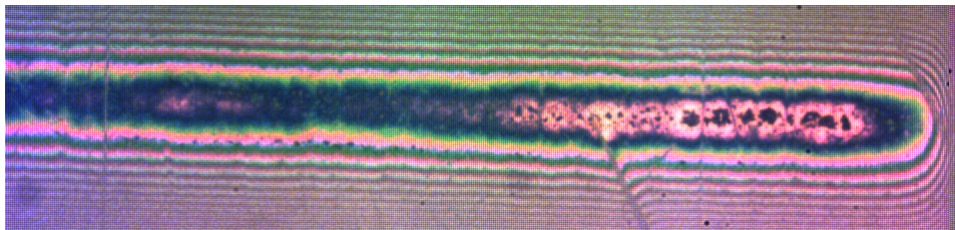
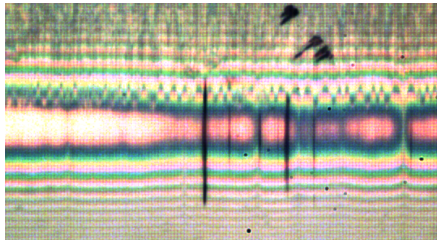
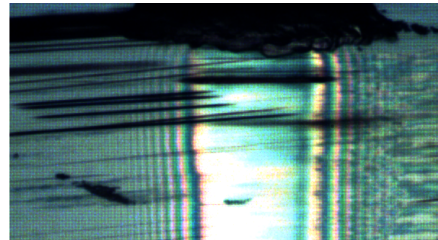


Figura 4.45: Zona del contatto con ingrandimento x3.

Una volta acquisite le immagini, alcuni problemi riscontrati nell'analisi sono stati la presenza di graffi sul disco e macchie d'olio nelle immagini come in Figura 4.46, che alterano l'analisi del programma.



(a)



(b)

Figura 4.46: Presenza di graffi, macchie di olio, nel contatto camma-disco.

in conseguenza a questi errori di forma, causati dalle generatrici non del tutto parallele, nelle immagini con l'ingrandimento x3 si vede il contatto avvenire prima su gran parte della lunghezza (Figura 4.47(a)), poi diventa localizzato Figura 4.47(b), come se la camma fosse inclinata, e infatti nella zona centrale si hanno colori più scuri, come se l'altezza fosse diminuita a causa della forza distribuita su meno lunghezza, in conseguenza a questo problema, le prove sono state fatte prima in corrispondenza del centro della linea di contatto, e poi in corrispondenza del contatto sul raccordo superiore che rimane sempre in contatto.

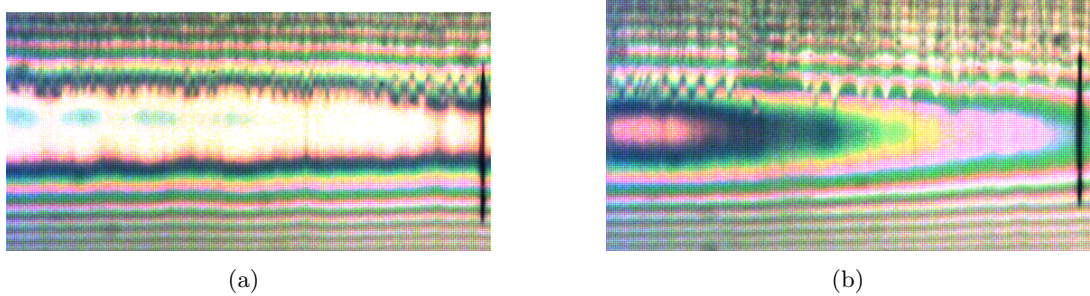


Figura 4.47: Problema degli errori di forma della camma: contatto su zona ampia (a), contatto localizzato (b).

Per quanto riguarda l'acquisizione delle forze, si sono manifestati dei disturbi sui segnali del dinamometro, dovuti alla presenza del motore acceso e della termocoppia attiva, ma tali disturbi sono risultati trascurabili.

## Capitolo 5

# Usura e regimi di lubrificazione

In questo capitolo viene analizzata l'usura prodotta nel disco di vetro, con lo scopo di stabilire i regimi di lubrificazione sviluppati nelle prove. Vengono poi analizzate le altezze adimensionali del meato ottenute dalla precedente analisi e confrontate con quelle teoriche per osservare le differenze tra i regimi previsti e quelli ottenuti. Questo studio viene effettuato a partire dalla misura del coefficiente d'attrito nelle prove, in quanto causa principale dei fenomeni d'usura adesiva e abrasiva, e legato ai regimi di lubrificazione dalle curve di Stribeck o nelle curve Lambda (altezza adimensionale del meato).

### 5.1 Valutazioni del coefficiente d'attrito

Nel capitolo precedente, sono state introdotte le misure delle forze d'attrito  $F_x$  (Figura 4.16) e normale  $F_z$  (Figura 4.15), filtrate e non, in questo paragrafo viene riportato l'andamento del rapporto tra i termini di queste due forze filtrate, per ottenere l'andamento del coefficiente d'attrito, utilizzato poi per capire l'usura prodotta sul disco. L'andamento del coefficiente d'attrito in funzione della coordinata angolare, è riportato in Figura 5.1.

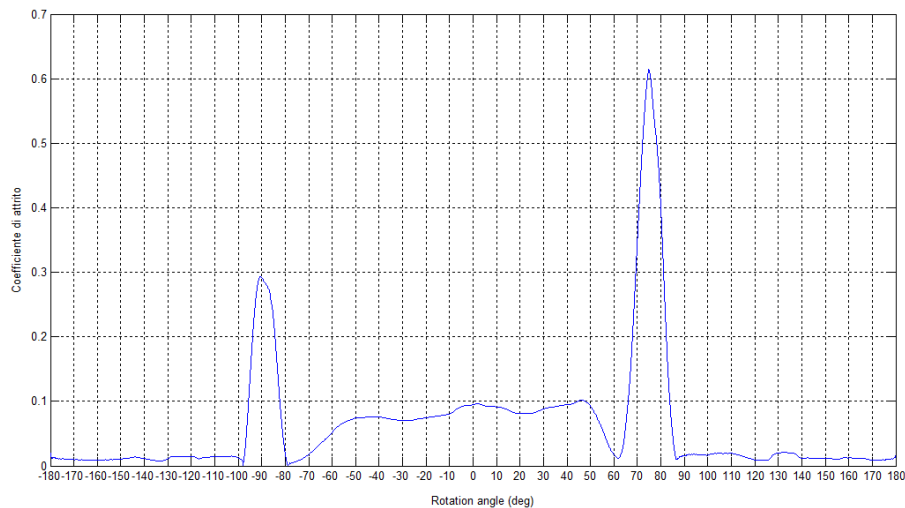


Figura 5.1: Coefficiente d'attrito in funzione della coordinata angolare, con  $R_q = 0.02\mu m$ .

è possibile notare come il coefficiente di attrito assuma valori molto alti, prossimi a 0.6 in corrispondenza di circa  $+75^\circ$ , e di 0.3 a  $-90^\circ$  in cui si ha l'effetto del ritorno geometrico, mentre si mantiene a circa 0.1 nella zona intorno al naso, e circa 0.01 nel cerchio di base. Il precedent grafico d'attrito è relativo alla camma utilizzata nelle prove analizzate, caratterizzata da una rugosità quadratica media di  $R_q = 0.02\mu m$ , è interessante osservare come una camma di stessa forma geometrica ma con rugosità molto maggiore  $R_q = 0.5\mu m$ , dia all'incirca i soliti andamenti delle forze  $F_z$  e  $F_x$ , ma il coefficiente d'attrito assuma in media valori maggiori, come riportato in Figura 5.2

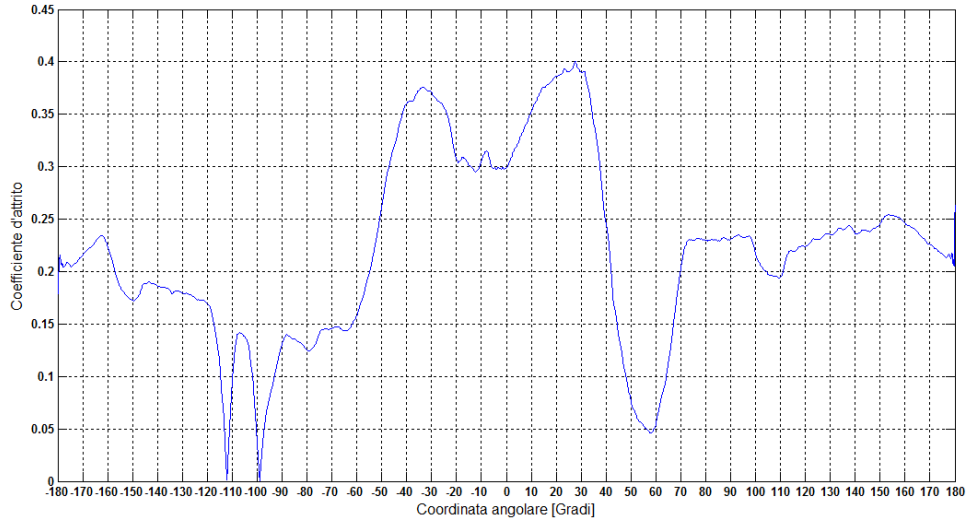


Figura 5.2: Coefficiente d'attrito per la camma di rugosità quadratica media  $R_q = 0.5\mu m$ .

in questa figura si nota inoltre l'assenza dei picchi laterali, ma emerge come, nonostante i valori massimi raggiunti siano minori del caso precedente, si abbia in media un valore del coefficiente d'attrito intorno a 0.25 mentre in precedenza era intorno a 0.1. Gli effetti di questa maggiore rugosità della camma, nel moto sul disco, saranno riportati nel successivo paragrafo, come confronto con l'usura del caso di  $R_q = 0.02\mu m$ .

## 5.2 Usura riscontrata sul disco in vetro dopo le prove svolte

In questo paragrafo, vengono riportate alcune immagini relative all'usura manifestatasi sul disco successivamente alle prove svolte con la camma spline. Tali immagini sono state prese nelle zone di contatto relative a diverse posizioni angolari, in particolare, vengono riportate in funzione dello spostamento lungo l'asse x, a partire dalla posizione centrale, corrispondente a 0 assunta in corrispondenza del cerchio base e del naso.

Queste immagini sono relative al contatto della zona di raccordo alto della camma, come indicato in Figura C, in quanto nella zona sottostante sono presenti sul disco graffi dovuti a prove passate, e in quanto è risultata essere la zona maggiormente caricata, infatti tale posizionamento è quello utilizzato anche per le immagini dell'analisi. L'ingrandimento utilizzato è il x4, con la presenza dell'ulteriore x2. Ogni immagine corrisponde a circa 2.1 mm x 1.6 mm.

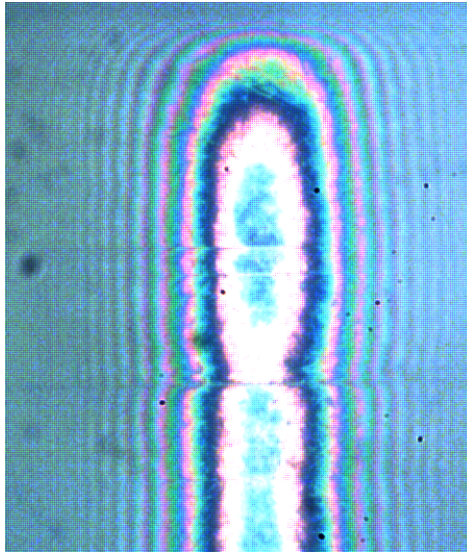


Figura 5.3: Immagine relativa alla zona della camma in contatto con il disco.

In Figura 5.4 viene riportata l'usura prodotta in corrispondenza della coordinata angolare zero, cioè su cerchio base e naso, in tale zona si è manifestata l'usura maggiore. Per quanto riguarda le forze e il coefficiente d'attrito  $f$ , in tale punto si ha:

- sul naso  $F_z = 250$  N;  $F_x = -25$  N;  $u = -0.008$  m/s;  $f = 0.1$  ;
- sul cerchio base  $F_z = 33$  N ;  $F_x = -0.5$  N ;  $u = -0.007$  m/s ;  $f = 0.015$  ;

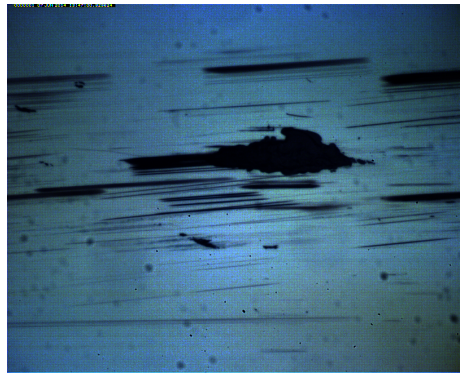


Figura 5.4: Usura sul disco in vetro nella posizione zero: cerchio base e naso della camma.

Spostandosi lungo l'asse  $x$  in verso negativo, è possibile osservare l'usura prodotta in corrispondenza dei punti distanti -2.5 mm, -9.5mm e -14.5.

L'usura prodotta in corrispondenza del punto distante -2.5 mm dal centro, relativo alle posizioni angolari di  $10^\circ$  e di  $66^\circ$  è riportata nella seguente Figura 5.5. In corrispondenza



dei  $66^\circ$  si ha la massima velocità del punto di contatto in direzione  $x$  (Figura 4.13(b)), in particolare per quanto riguarda le forze e l'attrito, in tale punto si ha:

- a  $10^\circ$   $F_z=230$  N ;  $F_x=-22$  N ;  $u=-0.006$  m/s;  $f = 0.09$  ;
- a  $66^\circ$   $F_z=70$  N ;  $F_x=-5$  N ;  $u=0.083$  m/s;  $f = 0.07$  ;

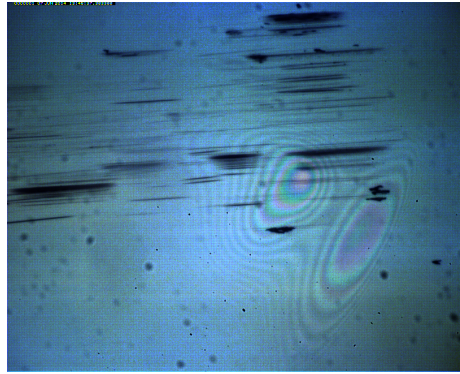


Figura 5.5: Usura sul disco in vetro nella posizione -2.5mm.

L'usura prodotta in corrispondenza del punto distante -9.5 mm dal centro, relativo alle posizioni angolari di  $30^\circ$  e di  $60^\circ$ , è riportata nella seguente Figura 5.6, per quanto riguarda forza e attrito, in tale punto si ha:

- a  $30^\circ$   $F_z=175$  N ;  $F_x=-15$  N ;  $u=-0.007$  m/s;  $f = 0.09$  ;
- a  $60^\circ$   $F_z=78$  N ;  $F_x=-1$  N ;  $u=0.06$  m/s;  $f = 0.01$  ;

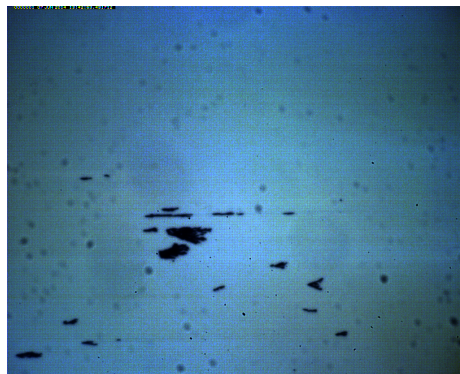


Figura 5.6: Usura sul disco in vetro nella posizione -9.5 mm.

L'usura prodotta in corrispondenza del punto distante -14.5 mm dal centro, relativo alla posizione angolare di  $47^\circ$  è riportata nella seguente Figura 5.7. Questo punto corrisponde al punto di inversione del moto in fase di discesa, inoltre l'immagine comprende anche la

zona in cui il contatto passa e l'entraining velocity si annulla ( a -14 mm ) passando da positiva a negativa, e lo slide to roll ratio tende a infinito dando strisciamento. Per quanto riguarda forza e velocità, in tale punto si ha:

- $F_z=120$  N ;  $F_x=-12$  N;  $u= 0.003$  m/s;  $f = 0.1$  ;

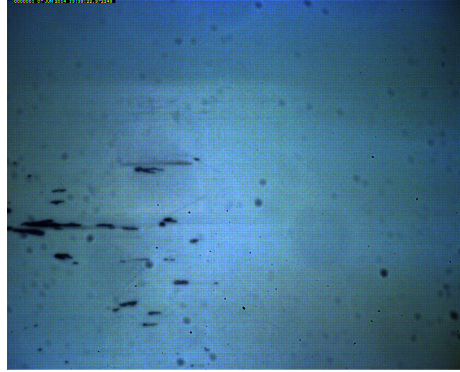


Figura 5.7: Usura sul disco in vetro nella posizione -14.5 mm.

Spostandosi invece lungo l'asse x ma in verso positivo, è possibile osservare l'usura prodotta in corrispondenza dei punti distanti +2.5 mm, +5.5mm e +14.5.

L'usura prodotta in corrispondenza del punto distante +2.5 mm dal centro, relativo alle posizioni angolari di  $-10^\circ$  e  $-67^\circ$ , è riportata nella seguente Figura 5.8. Tale punto si trova in prossimità della massima velocità del punto di contatto in salita, e anche in corrispondenza delle massime forze normale e di attrito, in particolare per quanto riguarda forza e attrito, in tale punto si ha:

- a  $-10^\circ$   $F_z= 242$  N;  $F_x= -21$  N ;  $u= -0.006$  m/s;  $f = 0.08$  ;
- a  $-67^\circ$   $F_z = 105$  N ;  $F_x= -3$  N ;  $u= 0.087$  m/s;  $f = 0.03$  ;

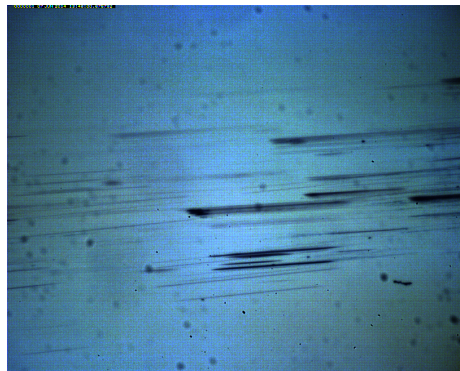


Figura 5.8: Usura sul disco in vetro nella posizione +2.5 mm.

L'usura prodotta in corrispondenza del punto distante +5.5 mm dal centro, relativo alle posizioni angolari di  $-18^\circ$  e  $-65^\circ$  è riportata nella seguente Figura 5.9. In tale punto viene raggiunta la massima velocità del punto di contatto nella coordinata angolare  $-65^\circ$ , in particolare per quanto riguarda forza e attrito, in tale punto si ha:

- a  $-18^\circ$   $F_z = 230$  N;  $F_x = -18$  N ;  $u = -0.008$  m/s;  $f = 0.08$  ;
- a  $-65^\circ$   $F_z = 105$  N ;  $F_x = -4$  N ;  $u = 0.084$  m/s;  $f = 0.04$  ;

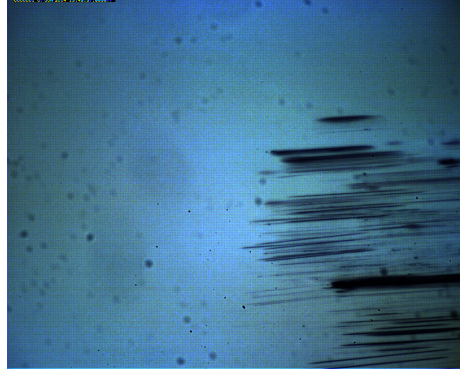


Figura 5.9: Usura sul disco in vetro nella posizione +5.5 mm.

L'usura prodotta in corrispondenza del punto distante +14.5 mm dal centro, relativo alla posizione angolare di  $-49^\circ$  è riportata nella seguente Figura 5.10. Questo punto corrisponde al punto di inversione del moto in fase di salita, e la figura comprende anche la zona in cui si ha l'annullamento dell'entraining velocity (+14 mm circa), la quale passa da negativa a positiva, e si ha strisciamento. Per quanto riguarda le forze e il coefficiente d'attrito, in tale punto si ha:

- $F_z = 125$  N;  $F_x = -12$  N;  $u = 0.0085$  m/s;  $f = 0.09$  ;

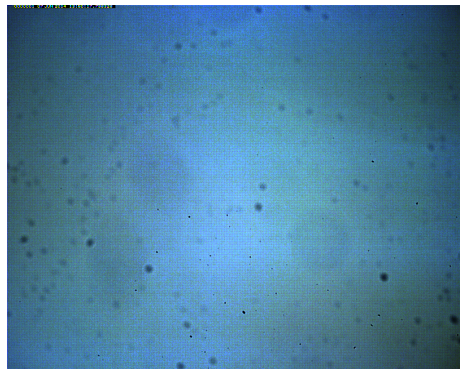


Figura 5.10: Usura sul disco in vetro nella posizione +14.5 mm.



Sono stati rappresentati i punti caratterizzati dalla maggior usura e gli estremi della corsa della camma, in particolare è possibile riscontrare come la maggior usura sia presente in corrispondenza della posizione zero, in quanto al passaggio del naso si ha la massima forza normale, una alta velocità del punto di contatto, e in tale zona si hanno anche i punti relativi all'alzata lineare, distanti dall'origine circa 0.8 mm, in cui si manifesta il massimo attrito (in verso positivo), durante il fenomeno dell'inversione momentanea del moto a  $-90^\circ$ ; in corrispondenza di questo posizionamento si ha anche la zona di alzata lineare, distante -0.8 mm, in cui si raggiunge il massimo valore del coefficiente d'attrito, a circa  $+75^\circ$ . Le forze agenti e il coefficiente d'attrito sono

- in  $-90^\circ$ :  $F_z = 68$  N;  $F_x = +30$  N;  $u = 0.008$  m/s;  $f = 0.29$  ;
- in  $+75^\circ$ :  $F_z = 62$  N;  $F_x = -40$  N;  $u = 0.008$  m/s;  $f = 0.61$  ;

Le immagini precedenti sono tutte relative alla camma spline di rugosità quadratica media  $R_q = 0.02 \mu m$ , mentre a scopo di confronto sulle conseguenze di usura di una camma con maggiore rugosità quadratica media, viene di seguito riportata la Figura 5.11 dell'usura prodotta dalla camma stesso profilo spline ma con  $R_q = 0.5 \mu m$ , con ingrandimento  $\times 1$ , in cui emerge come l'usura sia molto più marcata e distribuita su tutta la corsa.

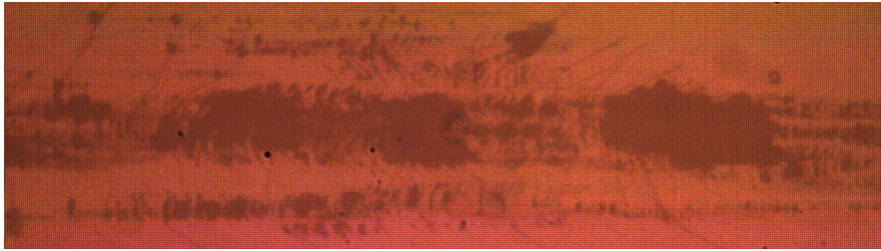


Figura 5.11: Usura sul disco in vetro nel caso di camma con  $R_q = 0.5 \mu m$ , circa 6mmx1.5 mm.

### 5.3 Regimi di lubrificazione riscontrati nell'analisi

Per analizzare i regimi di lubrificazione, viene effettuato un confronto tra le altezze minimi e centrali ottenute dalle formule teoriche con quelle ottenute dall'analisi sperimentale. Successivamente queste altezze vengono adimensionalizzate rispetto alla rugosità quadratica media dei due corpi a contatto, che in questo caso valgono :

- rugosità quadratica media della camma  $R_{qcamma} = 0.02 \mu m$ ;
- rugosità quadratica media del disco  $R_{qdisco} = 0.03 \mu m$ ;

Le altezze disponibili, vengono adimensionalizzate nel termine  $\lambda$  di altezza adimensionale secondo la formula

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{R_{qdisco}^2 + R_{qcamma}^2}} \quad (5.1)$$

in cui si inseriscono i valori delle altezze minima e centrale ricavate dall'analisi e anche le altezze ricavate dalla teoria, calcolate con le formule di Hamrock riportate di seguito

$$h_{minima} = 1.7 \cdot U^{0.711} \cdot G^{0.628} \cdot W^{-0.127} \cdot R \quad (5.2)$$

$$h_{centrale} = 2.922 \cdot U^{0.692} \cdot G^{0.470} \cdot W^{-0.166} \cdot R \quad (5.3)$$

in cui  $U = u_{entraining} \cdot \mu / (E' \cdot R)$ ,  $G = \alpha \cdot E'$  e  $W = F_z / (E' \cdot R)$  con  $E'$  e  $R$  modulo di young equivalente e raggio equivalente, dalla teoria di Hertz,  $\mu$  e  $\alpha$  viscosità e parametro di piezoviscosità le cui formule sono state riportate in precedenza.

Tutte le altezze ottenute nelle varie posizioni angolari, adimensionali e non, teoriche e sperimentali, minime e centrali, vengono riportate nella seguente Tabella 5.1

Posizione angolare $\phi$ [grad]	Altezza minima teorica [nm]	Altezza centrale teorica [nm]	Altezza minima sperimentale [nm]	Altezza centrale sperimentale [nm]	$\lambda_{minimo}$ teorica	$\lambda_{centrale}$ teorica	$\lambda_{minimo}$ sperimentale	$\lambda_{centrale}$ sperimentale
-180	38	54	48	63	1.05	1.5	1.33	1.75
-170	38	54	48	63	1.05	1.5	1.33	1.75
-140	38	54	48	64	1.05	1.5	1.33	1.77
-124	37	53	48	62	1.03	1.47	1.33	1.72
-110	37	53	47	62	1.03	1.47	1.30	1.72
-105	38	53	47	62	1.03	1.47	1.30	1.72
-102	65	100	89	120	1.74	2.7	2.45	3.22
-100	90	128	115	149	2.49	3.55	3.18	4.13
-98	64	100	89	120	1.74	2.7	2.45	3.22
-95	40	53	47	66	1.11	1.47	1.30	1.83
-85	40	52	45	63	1.11	1.44	1.25	1.75
-79	37	50	40	55	1.02	1.38	1.1	1.52
-75	35	48	46	60	0.95	1.33	1.30	1.68
-51	43	57	49	62	1.2	1.58	1.36	1.72
-49	37	50	41	57	1.02	1.38	1.13	1.58
-45	0	0	16	30	0	0	0.44	0.83
-15	19	23	25	37	0.53	0.64	0.69	1.02
0	20	25	29	41	0.55	0.7	0.8	1.13
+15	18	22	25	37	0.55	0.66	0.69	1.02
+45	0	0	20	35	0	0	0.55	0.97
+48	34	46	41	55	0.94	1.28	1.14	1.52
+51	40	51	47	60	1.11	1.37	1.30	1.68
+75	38	52	42	58	1.05	1.44	1.17	1.61
+80	39	55	47	62	1.08	1.53	1.30	1.72
+85	37	52	46	60	1.38	1.44	1.28	1.68
+90	40	56	47	66	1.11	1.55	1.30	1.83
+95	41	56	48	66	1.13	1.55	1.33	1.83
+98	69	115	89	129	1.86	3.25	2.45	3.56
+100	92	130	118	149	2.55	3.6	3.27	4.3
+110	38	53	47	62	1.05	1.47	1.30	1.72
+120	38	55	49	63	1.05	1.5	1.34	1.75
+140	38	54	48	63	1.05	1.5	1.33	1.75
+155	38	54	48	63	1.05	1.5	1.33	1.75
+170	38	54	49	63	1.05	1.51	1.33	1.75
+180	38	54	48	63	1.05	1.5	1.33	1.75

Tabella 5.1: Valori delle altezze minime, centrali e adimensionali, teoriche e sperimentali nei punti analizzati.

Nella tabella vengono riportati anche valori di immagini analizzate ma non riportate nel precedente capitolo. I dati disponibili sono stati ricavati anche dall'analisi di immagini in cui il profilo tridimensionale risulta molto disturbato, ma come risultati sono stati presi soltanto le altezze minime e centrali, con a esempio per il naso e i punti di massima accelerazione.

È possibile effettuare il confronto tra le altezze minime e centrali, teoriche e sperimentali, visibile in Figura 5.12, per osservarne le differenze.

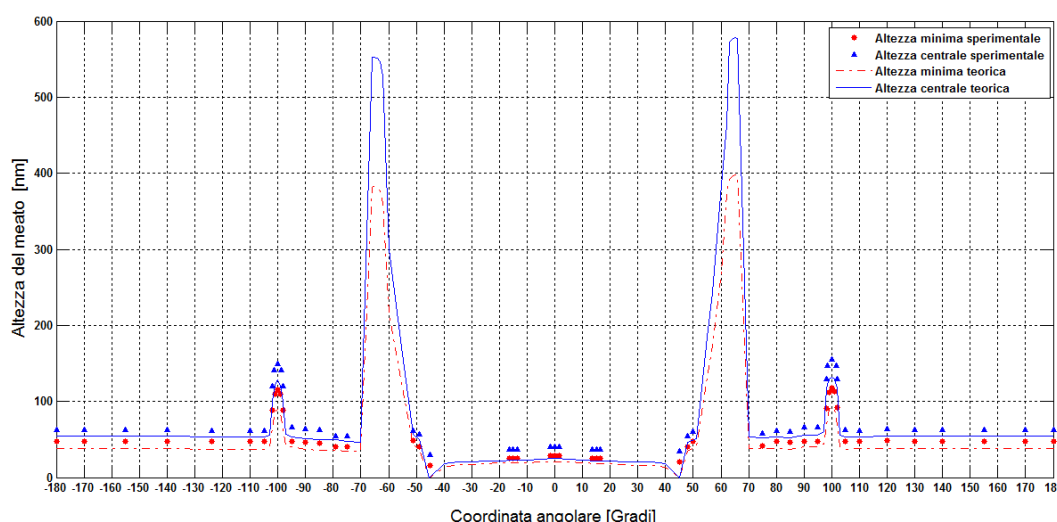


Figura 5.12: Andamenti delle altezze minime e centrali teoriche e calcolate dall'analisi.

Emergono alcune differenze tra le formule teoriche che tengono conto di condizioni stazionarie, e per questo sottostimano sia l'altezza minima che la centrale, rispetto a quelle analizzate con le immagini, che tengono meglio conto dei fenomeni di transitorio in atto, in particolare la differenza più netta è in corrispondenza dell'angolo  $+45^\circ$  e  $-45^\circ$  in cui dalle formule teoriche si avrebbero altezze nulle, mentre dall'analisi si hanno altezze diverse da zero, dovute al fenomeno dello squeeze, che si verifica proprio quando il fluido rimane intrappolato tra due superfici in avvicinamento, determinando la resistenza alla fuoriuscita del lubrificante dal contatto, rendendolo come un corpo molto rigido, impedendo l'avvicinamento. Comunque anche dai risultati sperimentali, le altezze in corrispondenza di questi due angoli, sono le altezze minime.

In particolare, nel punto a  $-45^\circ$  si hanno altezze sperimentali minori rispetto al  $+45^\circ$ , in quanto nel primo la velocità di entraining arriva a zero decelerando mentre nel secondo arriva a zero accelerando.

Il trend dei punti ottenuti sperimentalmente su un giro della camma, ha un andamento simile a quello teorico.

Si nota inoltre come il profilo delle altezze teoriche e sperimentali, sia molto simile a quello della velocità di entraining e al raggio di curvatura, infatti i massimi delle altezze si raggiungono nei punti in cui sono massimi questi due termini.

L'andamento dell'errore percentuale commesso con il calcolo teorico delle altezze rispetto alle valutazioni ottenute sperimentalmente, relativamente al confronto dei punti in cui è

stata svolta l'analisi interferometrica, viene riportato in Figura 5.13 sia per l'altezza minima che per la teorica, ed è possibile notare come tale errore non sia costante e non sia mai nemmeno nullo .

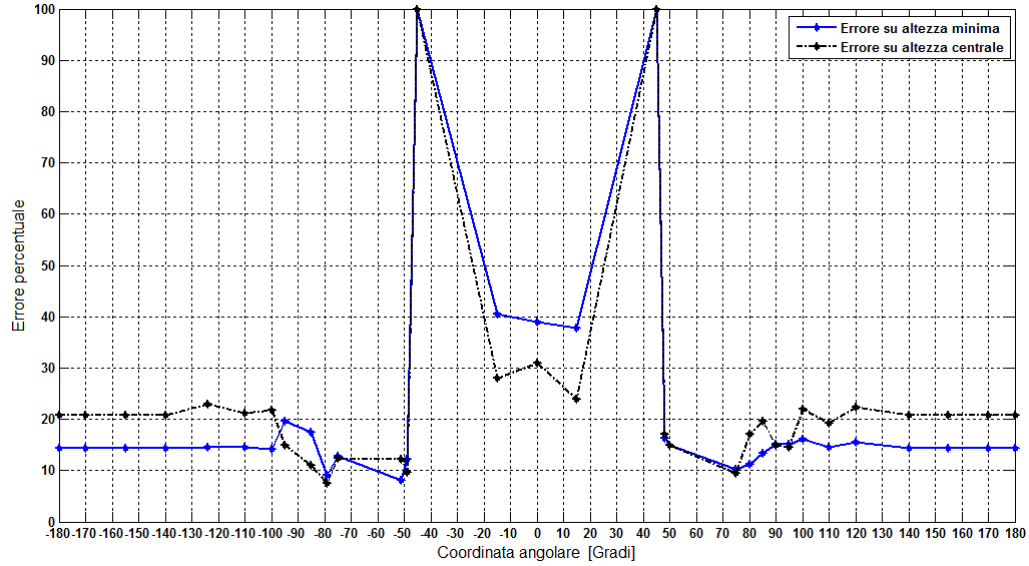


Figura 5.13: Errore percentuale sul calcolo delle altezze minime e centrali teoriche e calcolate.

L'errore rimane limitato a circa il 20 % sull'altezza minima, 15 % sull'altezza centrale nella zona del cerchio base, poi arriva al 100% in corrispondenza dei  $-45^\circ$  e  $45^\circ$ , diventa molto piccolo in corrispondenza dei punti a  $80^\circ$  circa.

Per analizzare il regime di lubrificazione con cui avviene il contatto, si riportano in Figura 5.14 gli andamenti delle altezze adimensionali, minime e centrali, sia teoriche che sperimentali, in funzione della posizione angolare corrispondente.

Tenendo conto delle immagini relative all'usura, riportate nel precedente paragrafo, si riscontra come i settori angolari in cui si ha maggior usura siano quelli tra  $-30^\circ$  e  $+30^\circ$ , tenendo conto delle altezze adimensionali della figura precedente, è possibile considerare come confine tra regime di lubrificazione limite e mista, il valore teorico di  $\lambda = 1$ , che contiene tutto il settore angolare tra  $-50^\circ$  e  $50^\circ$  circa, anche per i dati sperimentali, e inoltre si trova in prossimità del valore di 1.3 raggiunto nel cerchio base sperimentalmente dall'altezza minima. Per il limite tra lubrificazione mista e completa si considera il valore teorico di  $\lambda = 3$ , oltre il quale si hanno i punti tra  $-105^\circ$  e  $-100^\circ$ , tra  $-85^\circ$  e  $-55^\circ$ , tra  $+50^\circ$  e  $+75^\circ$ , e tra  $+100^\circ$  e  $+105^\circ$ . Considerano come estremi del regime di lubrificazione mista i valori 1 e 3 di  $\lambda$ , si osserva dalla precedente figura, come la curva teorica di altezza adimensionale minima, suggerisca un regime di lubrificazione limite su gran parte della rotazione, in particolare nelle zone tra  $-50^\circ$  e  $50^\circ$ , in cui arriva addirittura a zero in  $45^\circ$  in cui si ha anche il picco di attrito e l'asintoto dello slide to roll ratio, generando strisciamento puro, i cui effetti sono nelle immagini dell'usura, diventa poi lubrificazione mista nei settori angolari tra  $-120^\circ$  e  $85^\circ$  e tra  $80^\circ$  e  $115^\circ$  circa, nei restanti punti si mantiene intorno a circa 1.

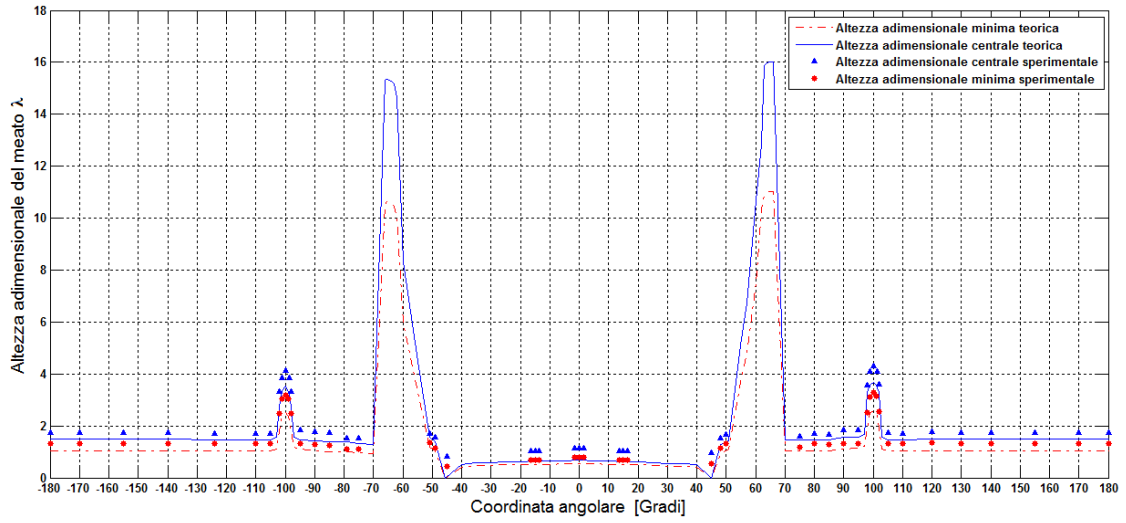


Figura 5.14: Andamenti delle altezze adimensionali minime e centrali teoriche e calcolate dall'analisi.

L'altezza adimensionale centrale teorica mostra un regime limite ridotto al settore angolare tra  $-20^\circ$  a  $50^\circ$ . La curva sperimentale di altezza adimensionale minima è caratterizzata da un prevalente regime misto con valori sopra 1, con l'esclusione del settore tra  $-20^\circ$  e  $50^\circ$  in cui si scende nella lubrificazione mista, ma si ha anche alcune zone con lubrificazione completa, in cui  $\lambda$  arriva a circa 3.5, infine la curva di altezza centrale sperimentale adimensionale, è caratterizzata quasi esclusivamente da un regime di lubrificazione mista, con delle zone di lubrificazione completa. Dai dati sperimentali si avrebbe quindi un prevalente regime di lubrificazione mista, con dei picchi di lubrificazione completa.

I valori sperimentali risultano quindi prevalentemente tra  $\lambda = 1$  e  $\lambda = 2$ .

## Capitolo 6

# Considerazioni finali

### 6.1 Risultati

Dalle prove sperimentali svolte è stato possibile analizzare un contatto di linea particolare, come quello camma-piattello, in cui si ha una continua variazione delle forze, delle velocità e delle posizioni del punto di contatto. Sfruttando l'attrezzatura disponibile presso il Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale di Pisa, è stato possibile ricavare i valori delle forze del contatto e acquisire le immagini, dalla cui analisi è stato possibile ricavare i classici profili elastoidrodinamici per i contatti di linea, e valutare le altezze del meato nel contatto grazie all'analisi tridimensionale, nonostante gli errori e i problemi riscontrati in precedenza, in questo modo è stato possibile effettuare il confronto con i dati teorici. L'analisi svolta e le immagini ottenute, nell'ambito dei contatti di linea, risultano poco presenti nelle varie bibliografie.

Per l'elaborazione delle immagini è stato scelto di lavorare con lo spazio dei colori HSV, di cui sono state mostrate le componenti relative alle immagini utilizzate per la calibrazione, in quanto permette di lavorare con una sola componente: la tonalità H, mentre saturazione S e valore V non sono influenti, invece di dover utilizzare 3 componenti come succede nello spazio RGB.

L'attrezzatura ottica ha permesso di ricavare immagini per la calibrazione del colore, in modo da legare la tonalità del colore H alle altezze del contatto, a partire da un contatto di geometria e carico noti, sfruttando il modello teorico di deformazione dei corpi in contatto, per contatti di linea, all'esterno dell'impronta hertziana, ottenuto da ricerca bibliografica.

Dalla calibrazione sono emerse le differenze delle tavole di calibrazione per la camma sferica e la spline, dovute ai diversi materiali, inoltre sono state rilevate le differenze dovute alla presenza dell'olio nel contatto rispetto all'aria, rilevandone un'approssimazione del valore dell'indice di rifrazione. Sono stati analizzati infine gli effetti di diversi carichi applicati al contatto, e diversi ingrandimenti del microscopio, riscontrando come siano poco rilevanti. Le tavole di calibrazione ottenute hanno un range di misura che non supera gli  $0.7 \mu m$  circa, ma non si è rivelato un problema, perché le altezze misurate sono inferiori, inoltre non è stato necessario imporre una variazione dell'indice di rifrazione con la pressione, in quanto nel caso in esame, risulta trascurabile, quindi anche la misura delle altezze non richiede correzioni.

Ottenuta la tavola di calibrazione, sono state svolte delle prove di movimento per ottenere le immagini del contatto tra camma spline e disco, nei punti chiave del moto del contatto. I parametri di precarico e velocità di rotazione imposti, sono stati scelti sulla base di prove passate.

A partire dal programma di analisi delle immagini per contatti di punto, utilizzato in passato, sono state fatte delle modifiche e correzioni per lavorare con i contatti di linea. Il programma di analisi delle immagini ottenuto in questo lavoro, si è rivelato versatile ed efficace, in quanto ha permesso di ottenere risultati di altezze minime e centrali anche in immagini molto scure e con poche frange, inoltre è riuscito a riprodurre i profili tridimensionali del meato in molte posizioni angolari, evidenziando anche le variazioni dovute ai diversi raggi di curvatura della camma, e riuscendo a riprodurre i profili tipici dei contatti elastoidrodinamici, mostrando, nel caso analizzato, la variazione del profilo al cambiare del segno della velocità di entraining.

Rispetto al programma di analisi delle immagini utilizzato in passato ([10]), quello sviluppato in questo lavoro è risultato più automatizzato, richiedendo meno input e ottenendo risultati in automatico, garantendo l'analisi delle numerose serie di immagini ottenute.

Con i risultati rilevati dalle prove, in particolare i valori delle forze normale e di attrito, e sfruttando la conoscenza della geometria della camma per ottenerne la cinematica, è stato possibile calcolare le altezze minime e centrali fornite dalle formule teoriche di Hamrock, in funzione della coordinata angolare, di conseguenza è stato possibile effettuare il confronto con i valori ottenuti dal programma di analisi, da cui sono emerse le differenze dovute a fenomeni di transitorio, come lo squeeze.

Ottenuti i valori delle altezze e nota la rugosità quadratica media di camma e disco, è stato possibile analizzare i regimi di lubrificazione cui è soggetto il contatto, riferendosi alle immagini di usura ottenute, da cui è emerso come il regime prevalente sia di lubrificazione mista.

In conclusione, il programma ottenuto ha permesso di avviare un'analisi interferometrica sui contatti di linea, finora poco seguita, da cui potranno essere sviluppate nuove prove e approfondimenti, come indicato nel successivo paragrafo.

## 6.2 Sviluppi futuri

In seguito ai risultati ottenuti da questo lavoro, e alle possibilità dell'attrezzatura disponibile, possono venire affrontate delle modifiche al programma di analisi e delle nuove prove relative ai contatti di linea. Per quanto riguarda il programma di analisi, potrebbero essere fatte delle modifiche in modo da farlo lavorare direttamente con lo spazio dei colori RGB, invece che convertire in HSV, evitando possibili errori e disturbi nella conversione, inoltre il programma potrebbe essere reso ancora più automatizzato, in modo da richiedere ancora meno input da parte dell'utente. Infine qualora venisse ancora utilizzato lo spazio HSV per svolgere l'analisi, potrebbe risultare utile giustificare la presenza di vibrazioni nella componente H, e se possibile provare a ridurle.

Alcuni sviluppi possono essere fatti riguardo le prove da svolgere, in quanto in questo lavoro sono state effettuate mantenendo la telecamera fissa nelle posizioni chiave per il movimento camma-piattello, mentre recentemente sono stati acquistati nuovi moduli di controllo per il sistema di movimentazione e con le modifiche cui verrà sottoposta l'attrez-

zatura, sarà possibile imporre alla telecamera un moto traslatorio continuo, quindi sarà possibile effettuare prove con la telecamera in movimento, in modo da riprendere tutta la corsa della camma, acquisendo quindi tutte le posizioni angolari. Sempre in merito alle prove da svolgersi in futuro, possono essere fatte delle prove anche a diverse velocità di rotazione per vederne gli effetti, entro i limiti delle possibilità di acquisizione delle immagini della telecamera.

Altro tipo di prove future, riguardano simulazioni del contatto camma-disco, nel caso in cui anche il disco possa muoversi, in particolare l'attrezzatura disponibile può permetterne la rotazione, in questo caso non è necessario quindi che la telecamera si muova.

Ottenuto un programma di analisi delle immagini adatto ai contatti di linea, e testato con buoni risultati, diventa possibile effettuare prove su camme con profilo di denti di ruote dentate in modo da poter simulare l'ingranamento, e rilevarne gli aspetti principali, come fatto in questo lavoro.



# Appendice A

## Script di matlab

### A.1 Analisi delle immagini

```
%Programma per l'analisi di immagini interferometriche ottenute mediante
% luce bianca, con lo scopo di ottenere l'altezza del meato, per contatti
% di linea.
% Sviluppato con Matlab 2012 presso il
% Dipartimento di ingegneria civile e industriale di Pisa.
% e richiesta la Matlab Image Processing Toolbox.

% Inizializzazione *****
clear; % Reset workspace
clc; % Reset command window
close all; % chiusura figure

% Costanti utilizzate *****
NBH = 20; % Dimensione matrice di filtraggio
MAPSIZE = 471; % Dimensione matrice
MAPRAD_SM = floor(MAPSIZE/2); % Maggior raggio
PLOT RANGE = [-1 0]; % Range lungo asse Z
% Parametri variabili durante l'analisi *****
uwThreshold = 0.6; % Valore di soglia per il phase unwrapping
maxRad = 260; % Massima distanza dal centro dell'immagine(modificabile con i diversi
ingrandimenti)

% Titolo dell'analisi
customTitle = input(' Titolo delle prove: ','s');
% Caricamento della tavola di calibrazione
calFileName = input(' nFile della tavola di calibrazione: ','s');
load(calFileName);
% Inserire il raggio di curvatura della camma
radCAM = input(' nRaggio della camma nell istante considerato: ');
% Inserire la sorgente delle velocita di entraining: se da file o manuale
```

```

speedSource = input (...
' nCaricare i dati della velocita da File [f] o Manualmente [m] ? ', 's');
if strcmp(speedSource, 'f')
speedFileName = input('Nome file: ', 's');
load(speedFileName);
end

% In caso di inserimento manuale dei dati
if strcmp(speedSource, 'm')
u = input(' nVelocita di entraining u in m/s : ');
end
% Inserimento parametri per stimare il valore centrale e minimo teorici
s = input(' nCoefficiente di scorrimento s: ');
eta0 = input(' nViscosita dell olio eta0 in Pas: ');
alpha = input(' nParametro di piezoviscosita alpha: ');
normalForce = input(' n Forza normale in N: ');
Larghezza_camma = input(' nLarghezza della camma in mm: ');
% Inserimento del file immagine da analizzare: deve essere in formato
% .TIFF
disp(' ');
disp('Nome del file immagine da analizzare, (i 4 numeri finali e');
imageName = input('l estensione .TIF sono messi in automatico): ', 's');
cropColLeft = input(' nLimite sinistro dell immagine da utilizzare: ');
cropColRight = input(' nLimite destro dell immagine da analizzare: ');
% Salvataggio temporaneo
save temp.mat;
% Process images *****

iCurrentImage = 1; % Number of the current image
nImagesFound = 0; % Total number of images found in the directory
contProc = 1; % Control variable for the subsequent loop
while contProc == 1 % Se ci sono piu immagini da analizzare
% sfrutta la stringa finale di 4 numeri, dalla 0001, poi analizza le
% successive, devono avere lo stesso nome base, e i numeri in sequenza:
% a esempio BASE_0001 fino a BASE_0002 e cosi via
if iCurrentImage < 10
numberString = sprintf('000elseif iCurrentImage < 100
numberString = sprintf('00elseif iCurrentImage < 1000
numberString = sprintf('0else
numberString = sprintf('end
imageFileName = strcat(imageName, numberString, '.tif');
% Carica l'immagine e ne prende le info principali, poi mette sul display
% Occorre che il file sia nella stessa cartella
if exist(imageFileName, 'file') == 2 % Controlla che il file ci sia
nImagesFound = nImagesFound+1; % Conta le immagini con nome base
% Converte l'immagine nello spazio HSV

```

```

hsvImage = rgb2hsv(imread(imageFileName));
hMat = hsvImage(:,:,1); hsvImage(:,:,2) = 0.75; hsvImage(:,:,3) = 0.75; % Riconversione
nello spazio RGB (solo per motivi di rappresentazione,
% non per il processo) e la mostra nei limiti selezionati in precedenza
rgbImage = hsv2rgb(hsvImage(:, cropColLeft:cropColRight, :));
clc; % Pulizia della command window
% Informazione dell'avvio dell'analisi
disp(strcat('Analisi dell immagine ', imageFileName, '.'));
disp('*****');

% L'utente sceglie la linea centrale delle frange e ottiene
% la massima distanza dal centro
%[centerLINE, maxRadP] = Lselect(rgbImage, 'line');
figure(1); % plot figura
imshow(rgbImage); % mostra l'immagine
hold on
centerLINE= round([size(rgbImage,2)/2 size(rgbImage,1)/2]) ;
point2=[centerLINE(1),centerLINE(2)+500];
point3=[centerLINE(1),centerLINE(2)-500];
X=[ point2(1); point2(1); point2(1)];
Y=[ centerLINE(2); point2(2); point3(2)];
LINEACENTRALE=line(X,Y);
disp(sprintf...
('Visualizzazione dei risultati ottenuti, premere invio per continuare'))
pause
close all

max1 = centerLINE(1); % Distanza limite sinistro
max2 = size(rgbImage,2) - centerLINE(1); % Distanza limite destro
max3 = centerLINE(2); % Distanza limite superiore
max4 = size(rgbImage,1) - centerLINE(2); % Distanza limite inferiore
% Raccolta risultati
maxRadP = min([max1 max2 max3 max4]) - 1;
% Modifiche alle coordinate del centro dell'immagine, per tenere conto dei
% tagli della fase precedente
centerLINE(1) = centerLINE(1) + cropColLeft - 1;
% se la distanza massima e piu piccola di quella fissata all'inizio
% cambia la variabile maxRad con la piu piccola
if maxRadP < maxRad
maxRad = maxRadP;
end

maxRad = 210 (modificabile con i diversi ingrandimenti);
ok = 'n'; % Controllo variabili finch  l'utente non accetta la soglia
while strcmp(ok, 'n')
% Phase unwrap del profilo di valori H

```

```

hLineMat_u = unwrapehl(hMat, uwThreshold);
% Correzione risultati
hLineMat_uP = ... % inizio
zeros(size(hLineMat_u,1)+2*NbH, size(hLineMat_u,2));
hLineMat_uP(1:NbH,:) = ...
hLineMat_u(size(hLineMat_u,1)-NbH+1 : end, :); hLineMat_uP(size(hLineMat_uP,1)-NbH+1
: end, :) = ...
hLineMat_u(1:NbH, :);
hLineMat_uP(NbH+1:end-NbH, :) = hLineMat_u;
% Interpolazione
k = 1;
hLineMat_uM = zeros(round(size ... % Initialize
(hLineMat_u,1)/(2*NbH+1)), size(hLineMat_u,2));
for i = NbH+1 : floor(NbH/2) : size(hLineMat_uP,1)-NbH
hLineMat_uM(k,:) = ...
median(hLineMat_uP(i-NbH : i+NbH, :));
k = k+1;
end

% Correzione finale
hLineMat_uMP = zeros(size(hLineMat_uM,1)+1, ...
size(hLineMat_uM,2)); % Inizio
hLineMat_uMP(end, :) = hLineMat_uM(1,:);
hLineMat_uMP(1:end-1, :) = hLineMat_uM;
% Plot risultati di phase unwrapping
figure; surf(hLineMat_uM); % Crea superficie 3d con surf
shading interp; % Interpolazione
% Richiesta di accettare e rifiutare il risultato ottenuto in base alla
% soglia
ok = input (...
' nAccept phase unwrapping [y] o cambiare soglia [n]? '...
, 's');
close % chiudere finestre
if strcmp(ok, 'n') % Richiesta nuova soglia
uwThreshold = input ...
(sprintf('Nuova soglia di Unwrapping (precedente: %f): ', uwThreshold));
end
end % Fine del Phase Unwrapping (dopo aver accettato!)
zeroRad=205; (modificabile con i diversi ingrandimenti)
figure('Position',[100 200 1.5*size(hLineMat_uM,2) 1.5*size(hLineMat_uM,2)]);
pcolor(hLineMat_uM);
shading interp;
hold on;
minFilmPoint=ginput(1);
close % chiudere finestre
for i = -maxRad:maxRad

```

```

for j = -maxRad:maxRad
radius = round(norm([i j]));
if radius >= 3*zeroRad
hLineMat_uM(i+maxRad+1, j+maxRad+1) = 0;
end
end
end
% Scelta della distanza cui tagliare l'immagine, in base all'area
% contenente le informazioni volute
if zeroRad < 2*maxRad
cropRad = round(zeroRad);
else
cropRad = maxRad;
end

% Solo i valori di H dell'area importante sono messe in matrice
hMat_uC = hLineMat_uM(round(maxRad+1-cropRad:size(hLineMat_uM)), ...
round(maxRad+1-cropRad:(maxRad+1+cropRad)/2));
% Ridimensiona la matrice per velocizzare il processo
hMat_uSmall = imresize(hMat_uC, [MAPSIZE MAPSIZE]);
scaling = MAPSIZE/(2*cropRad+1);
% Sfruttando la tavola di calibrazione cerca l'altezza minima e le
% coordinate del punto nelle coordinate originali H wrapped
minFilmPoint_O = flipdim(round(minFilmPoint),2) - ...
[maxRad + 1 maxRad + 1] + flipdim(round(centerLINE),2);
% Per ridurre i disturbi, effettua la media dei 3x3 termini vicini
h0 = median(median(hMat ...
(abs(minFilmPoint_O(1)-1):abs(minFilmPoint_O(1)+1), ...
abs(minFilmPoint_O(2))-1:abs(minFilmPoint_O(2)+1))));
h1 = h0-0.5; h2 = h0- 1; h3 = h0-1.5; h4 = h0-2; h5 = h0-2.5; % Cerca i termini corri-
spondenti nella matrice
found0 = find(calTable(1,:) < h0);
found1 = find(calTable(1,:) < h1);
found2 = find(calTable(1,:) < h2);
found3 = find(calTable(1,:) < h3);
found4 = find(calTable(1,:) < h4);
found5 = find(calTable(1,:) < h5);
if found0(1) == 1
found0 = found1;
found1 = found2;
found2 = found3;
end

% Ottengo vettore con i probabili valori di minimo
minFilmChoices = 1000*[calTable(2, found0(1)) ...
calTable(2, found1(1)) calTable(2, found2(1)) calTable(2, found3(1))...

```

```

calTable(2, found4(1)) calTable(2, found5(1)) ];
% Ripeto il processo per l'altezza del punto centrale
h0c = median(median(hMat(1:end,1:3)));
h1c= h0c-0.5;
h2c = h0c-1;
h3c = h0c-1.5;
h4c = h0c-2;
h5c = h0c-2.5;
found0c = find(calTable(1,:) < h0c);
found1c = find(calTable(1,:) < h1c);
found2c = find(calTable(1,:) < h2c);
found3c = find(calTable(1,:) < h3c);
found4c = find(calTable(1,:) < h4c);
found5c = find(calTable(1,:) < h5c);
if found0c(1) == 1
found0c = found1c;
found1c = found2c;
found2c = found3c;
end
cntFilmChoices = 1000*[calTable(2, found0c(1)) ...
calTable(2, found1c(1)) calTable(2, found2c(1)) calTable(2, found3c(1))...
calTable(2, found4c(1)) calTable(2, found5c(1)) ];
% Legge la velocita di rotolamento se presa da file
if strcmp(speedSource, 'f')
u = speeds(nImagesFound);
end

% Confronto dei valori di altezza minimo e centrale con le formule di
% Hamrock in condizioni stazionarie, di puro rotolamento
minFilm_calc = 1.7e6*((u*1e3)^0.711)*((eta0*1e-6) ^0.711)*radCAM ^0.416*...
(alpha*1e6)^0.628*(1.148e5^0.044)/(normalForce/Larghezza_camma)^0.127;
cntFilm_calc = radCAM*1e6*2.922*(((u*1e3)*(eta0*1e-6)/(1.148e5*radCAM))^0.692)*...
(alpha*1e6*1.148e5)^0.47)/...
(((normalForce/Larghezza_camma)/(1.148e5*radCAM)))^0.166;

% Confronto dei valori di altezza minima ottenuti con quello calcolato, lo
% script sceglie quello piu vicino: min1 = abs(minFilmChoices(1)-minFilm_calc);
min2 = abs(minFilmChoices(2)-minFilm_calc);
min3 = abs(minFilmChoices(3)-minFilm_calc);
min4 = abs(minFilmChoices(4)-minFilm_calc);
min5 = abs(minFilmChoices(5)-minFilm_calc);
min6 = abs(minFilmChoices(6)-minFilm_calc);
MIN_Vec=[ min1 ; min2 ; min3 ; min4 ; min5 ; min6 ];
M=min(MIN_Vec);
if M==min1;
minimo=minFilmChoices(1);

```

```

elseif M==min2;
minimo=minFilmChoices(2);
elseif M==min3;
minimo=minFilmChoices(3);
elseif M==min4;
minimo=minFilmChoices(4);
elseif M==min5;
minimo=minFilmChoices(4);
elseif M==min6;
minimo=minFilmChoices(5);
end
disp(sprintf(' Altezza minima ottenuta dall analisi : %3.0f nm '...
, Minimo_ottenuto));
disp(' ');
disp(sprintf(...
' Altezza minima teorica con s = 0 e u: %3.0f nm'...
, minFilm_calc));
disp(' ');

% Confronto dei valori di altezza centrale ottenuti con quello calcolato,
% lo script sceglie quello piu vicino:
cen1 = abs(cntFilmChoices(1)- cntFilm_calc);
cen2 = abs(cntFilmChoices(2)- cntFilm_calc);
cen3 = abs(cntFilmChoices(3)- cntFilm_calc);
cen4 = abs(cntFilmChoices(4)- cntFilm_calc);
cen5 = abs(cntFilmChoices(5)- cntFilm_calc);
cen6 = abs(cntFilmChoices(6)- cntFilm_calc);
CEN_Vec=[ cen1 ; cen2 ; cen3 ; cen4 ; cen5 ; cen6 ];
C=min(CEN_Vec);
if C==cen1;
centro = cntFilmChoices(1);
elseif C==cen2;
centro = cntFilmChoices(2);
elseif C==cen3;
centro = cntFilmChoices(3);
elseif C==cen4;
centro = cntFilmChoices(4);
elseif C==cen5;
centro = cntFilmChoices(5);
elseif C==cen6;
centro = cntFilmChoices(6);
end
disp(sprintf(' Altezza centrale ottenuta dall analisi: %3.0f nm '...
, CENTRO_ottenuto));
disp(' ');
disp(sprintf(...

```

```

' Altezza centrale teorica con s = 0 e u: %3.0f nm'...
, cntFilm_calc));
disp(' ');
%Pausa per visualizzare i dati
disp(sprintf...
('Visualizzazione dei risultati ottenuti, premere invio per continuare'))
pause
% Cerca nella tavola gli spessori a partire da un punto generico
cntFilmThick = CENTRO_ottenuto ;
% Ricerca dei valori di H nella tavola di calibrazione
if find(calTable(2,:) > cntFilmThick/1000)>0;
found0 = find(calTable(2,*)> cntFilmThick/1000);
else
found0=find(max(calTable(2,)));
end
cntH = calTable(1, found0(1));

% Utilizzo del valore di H relativo all' altezza minima
hMat_uSmall = hMat_uSmall - hMat_uSmall(MAPRAD_SM+1, ...
MAPRAD_SM+1) + cntH;
thicknessMat = zeros(size(hMat_uSmall));
% Per gli altri punti si ricercano i valori di H per portarli in valori di
% altezza
for i = 1 : MAPSIZE
for j = 1 : MAPSIZE
found0 = find(calTable(1,:) < hMat_uSmall(i,j));
% Se non ci sono corrispondenze utilizza l'ultimo valore trovato
if isempty(found0)
thicknessMat(i,j) = calTable(2, size(calTable,1));
else
if found0(1) == 1
thicknessMat(i,j) = calTable(2,1);
% Interpolazione per i punti mancanti
else
thickCeil = calTable(2, found0(1));
thickFloor = calTable(2, found0(1)-1);
hCeil = calTable(1, found0(1));
hFloor = calTable(1, found0(1)-1);
thicknessMat(i,j) = -(thickFloor + ...
(hMat_uSmall(i,j)-hFloor)/(hCeil-hFloor) ...
*(thickCeil-thickFloor));
end
end
end % Loop colonna
end % Loop riga
% Filtro FIR sui risultati thicknessMat = firlowpass2(thicknessMat, 5);

```



```

%Calcolo dell'altezza minima e ricerca delle coordinate dei punti nella % matrice di H
minFilmPoint_sm = round(scaling*(minFilmPoint ...
- [maxRad+1 maxRad+1])) + [MAPRAD_SM+1 MAPRAD_SM+1];
% Media di un punto con i 3x3 vicini
minFilmThick = -1000*median(median(thicknessMat(minFilmPoint_sm(2) ...
-1:minFilmPoint_sm(2)+1, ...
minFilmPoint_sm(1)-1:minFilmPoint_sm(1)+1)));
% Assegna titolo ai plot in base ai parametri inseriti
diaTitle = strcat(customTitle, sprintf(...
', u = %1.4f ms^-1, s = %1.2f', u, s));
% Creazione degli assi X e Y in micron ( devono essere uguali )
xyAxis = [-MAPRAD_SM*pxLength/scaling : pxLength/scaling ...
: MAPRAD_SM*pxLength/scaling];
%Eliminazione disturbi alle estremita della figura:
altezza1 = thicknessMat+0.5*[thicknessMat(:,1) zeros(size(thicknessMat)...
,size(thicknessMat)-1)]+0.5* [zeros(size(thicknessMat),size(thicknessMat)...
-2) thicknessMat(:,size(thicknessMat))];

% Plot dell'altezza del contatto in 3D
surffig = figure(1);
surf(xyAxis, 2*xyAxis, altezza1);
%Propriet  degli assi
title(diaTitle);
xlabel('x [ mum]');
ylabel('y [ mum]');
zlabel('Altezza del meato [ mum]');
shading interp;

% Sezione orizzontale: lungo asse X
hlinefig = figure(2);
plot(xyAxis, -thicknessMat(MAPRAD_SM+1,:));
axis([xyAxis(1) xyAxis(end) 0 -PLOTTRANGE(1)]);
title(strcat(diaTitle, ', Sezione parallela all asse X (orizzontale)'));
xlabel('x [ mum]');
ylabel('Altezza meato [ mum]');
grid on; % Inserimento griglia sullo sfondo per mostrare meglio

% Sezione verticale : lungo asse Y
vlinefig = figure(3);
plot(xyAxis, -thicknessMat(:,MAPRAD_SM+1));
axis([xyAxis(1) xyAxis(end) 0 -PLOTTRANGE(1)]);
title(strcat(diaTitle, ', Sezione parallela all asse Y (verticale)'));
xlabel('y [ mum]');
ylabel('Altezza meato [ mum]');
grid on;

```

```

%Curve di livello
CurveLivello = figure(4);
[C, h] = contour (xyAxis, xyAxis, thicknessMat);
set(h,'ShowText','on','TextStep',get(h,'LevelStep')*2)
colormap cool
title(strcat(diaTitle, ', Curve di livello '));
xlabel('[ mum]');
ylabel('[ mum]');
grid on;

%L'utente decide se l'immagine deve essere analizzata nuovamente o se il
%programma puo continuare con la successiva, in questo caso e possibile
%salvare o rifiutare i dati ottenuti.
ok = input (...
'nSave results [y], process image again [n] or discard [d]? ','s');
if strcmp(ok, 'y') % In caso di salvataggio:
% Inserire nome file, Salvataggio della matrice di altezza del meato,
% dello spessore minimo e centrale, di u e di s, e salvataggio di tutti i
% plot.
% Salvataggio dati numerici
resultFileName = strcat('result_', numberString, '.mat');
save(resultFileName, 'thicknessMat', 'u', 's', ...
'hMat_uSmall', 'minFilmThick', 'cntFilmThick');
% Salvataggio profilo 3d
resultFileName = strcat('surface_', numberString, '.tif');
saveas(surffig, resultFileName);
% Salvataggio sezione x
resultFileName = strcat('sectionx_', numberString, '.emf');
saveas(hlinefig, resultFileName);
% Salvataggio sezione y
resultFileName = strcat('sectiony_', numberString, '.emf');
saveas(vlinefig, resultFileName);
% Salvataggio curve di livello
resultFileName = strcat('Curvliv', numberString, '.tif');
saveas(CurveLivello, resultFileName);

% Passaggio all'immagine successiva per l'analisi ( se esiste la sequenza)
iCurrentImage = iCurrentImage+1;
end
if strcmp(ok, 'd') % se i risultati sono da scartare:
resultFileName = strcat('thicknessMat_', numberString, '.mat');
save(resultFileName, 'u', 's', 'minFilmThick', 'cntFilmThick');
iCurrentImage = iCurrentImage+1;
end
% per riprocessare l'immagine, viene ridotto il numero alla sequenza del
% processo di analisi

```

```

if strcmp(ok, 'n')
nImagesFound = nImagesFound-1;
end
close all; % Riavvio immagine attuale
else

% incremento del numero immagine
if iCurrentImage < 9999
iCurrentImage = iCurrentImage + 1;
% controllo delle immagini con stesso nome e numerate da _0000 a _9999
else
% senza successive immagini:
if nImagesFound >= 1
disp(' ');
disp('Tutte le immagini sono state analizzate.');
```

else % In caso di errore

```

disp(' ');
disp('Errore: Nessuna immagine trovata');
```

end

```

contProc = 0; % Fine processo di controllo sequenza immagini
end
end
end % Fine del processo di analisi
disp(' ');
```

## Appendice B

# Analisi degli spettri di ampiezza delle forze misurate

### B.1 Spettri di ampiezza delle forze misurate

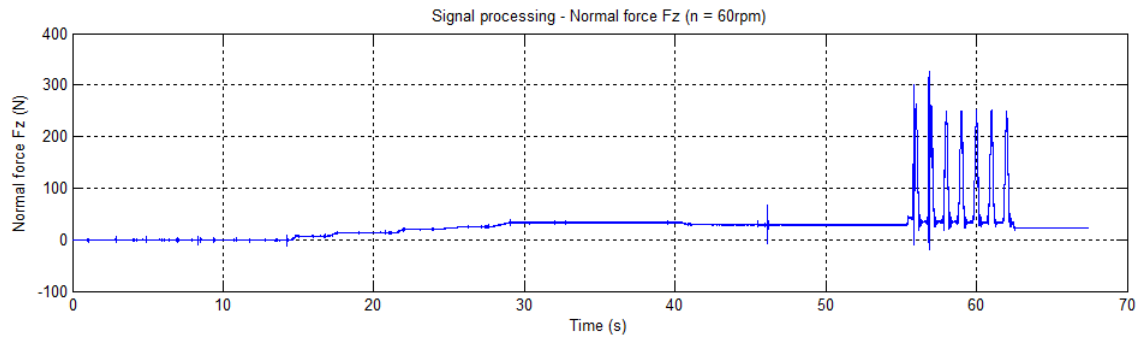
A partire dall'acquisizione totale delle forze  $F_z$  e  $F_x$  e del momento  $M_y$ , viene utilizzato lo script di filtraggio elaborato da [21] e implementato su Matlab. Le forze misurate durante tutta la prova, compresa la fase di precarico, sono riportate in Figura B.1(a) la forza normale  $F_z$ , in Figura B.1(b) la forza d'attrito  $F_x$  in Figura B.1(c) e il momento  $M_y$ , tutte in funzione del tempo di acquisizione dati.

Dai dati totali, sono stati ripresi esclusivamente quelli legati alla fase di movimento della camma, su cui viene fatto il filtraggio. I dati relativi alle forze durante il movimento della camma sono riportati in Figura B.2(a) per la forza normale  $F_z$ , in Figura B.2(b) per la forza d'attrito  $F_x$  e in Figura B.1(c) per il momento  $M_y$ , tutte in funzione del tempo di acquisizione dati, a partire dall'istante in cui la camma inizia a muoversi.

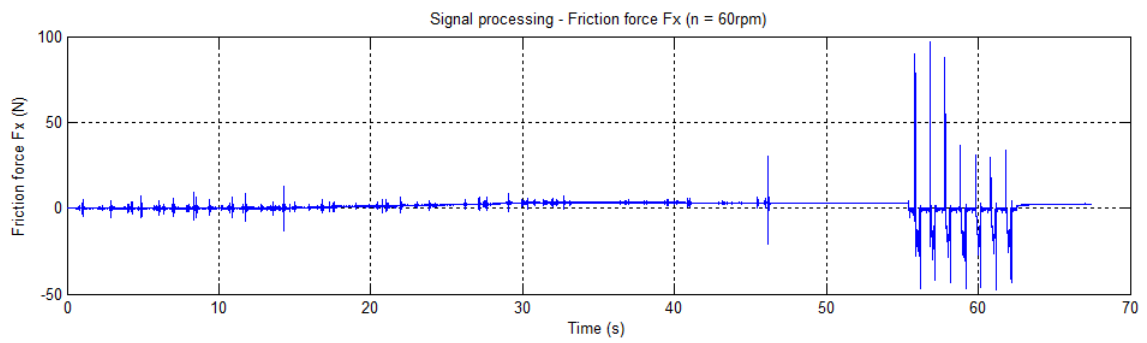
Per la scelta della frequenza di taglio da impostare al filtro di Butterworth, applicato alle forze misurate durante le prove con la camma in movimento, e implementato in Matlab secondo quanto riportato in [21], vengono di seguito riportati gli spettri di ampiezza delle forze analizzate, prima e dopo il filtraggio, ottenute con lo script di Matlab.

In Figura B.3(a) viene riportato lo spettro della forza normale  $F_z$ , in Figura B.3(b) lo spettro della forza d'attrito  $F_x$  e in Figura B.3(c) lo spettro del momento  $M_y$ , tutti spettri precedenti il filtraggio.

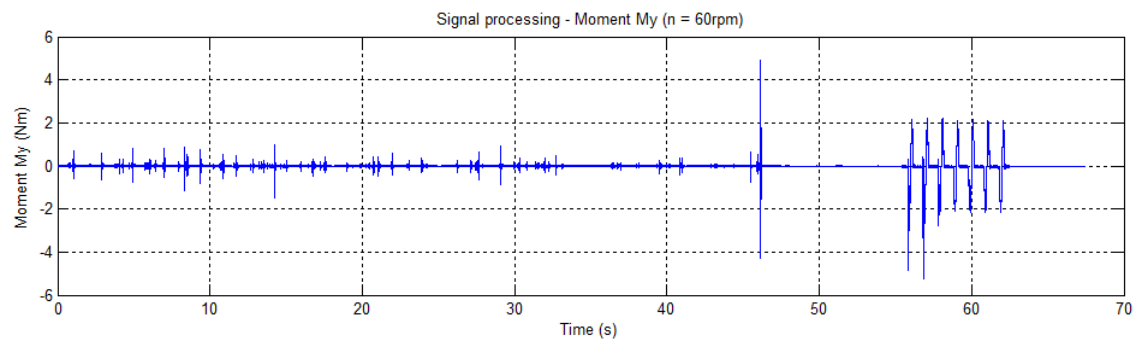
In Figura B.4(a) viene riportato lo spettro della forza normale  $F_z$ , in Figura B.4(b) lo spettro della forza d'attrito  $F_x$  e in Figura B.4(c) lo spettro del momento  $M_y$ , successivamente al filtraggio.



(a)

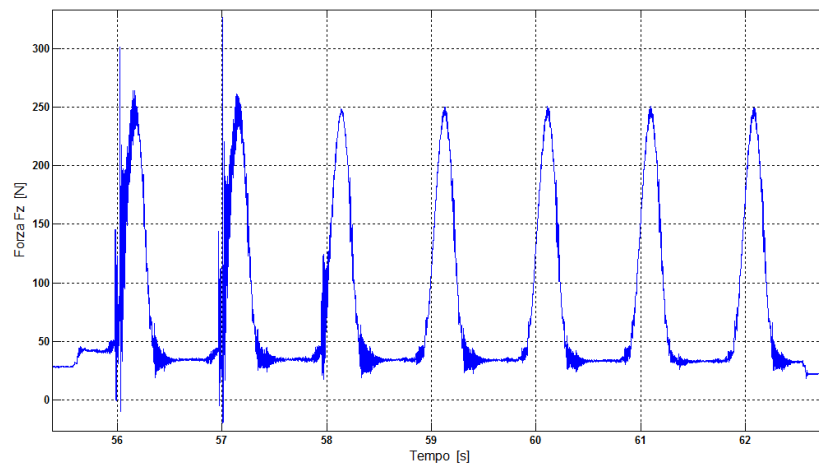


(b)

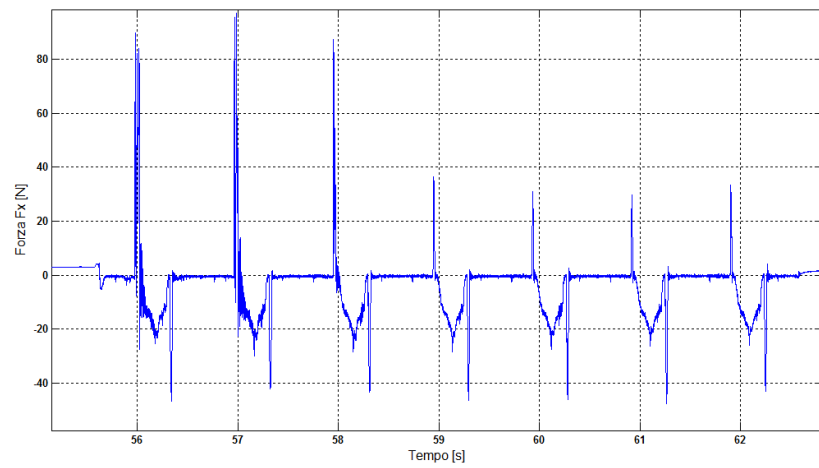


(c)

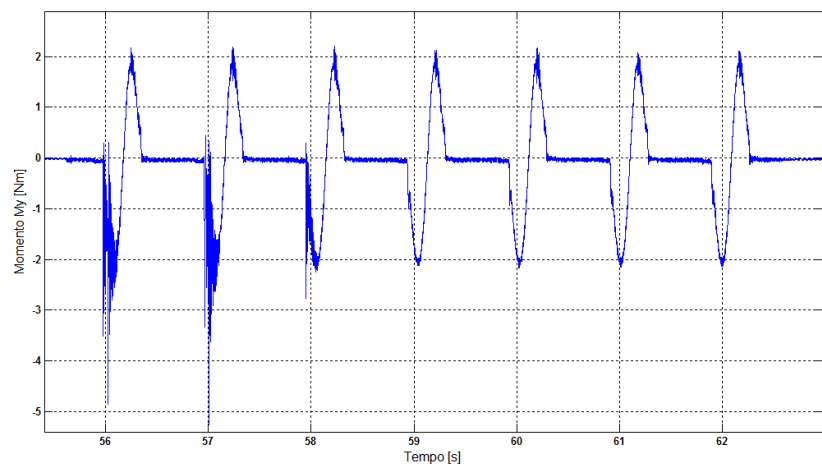
Figura B.1: Dati acquisiti durante la fase di precarico e tutta la prova: forza normale  $F_z$  (a), forza d'attrito  $F_x$  (b), momento  $M_y$  (c) .



(a)

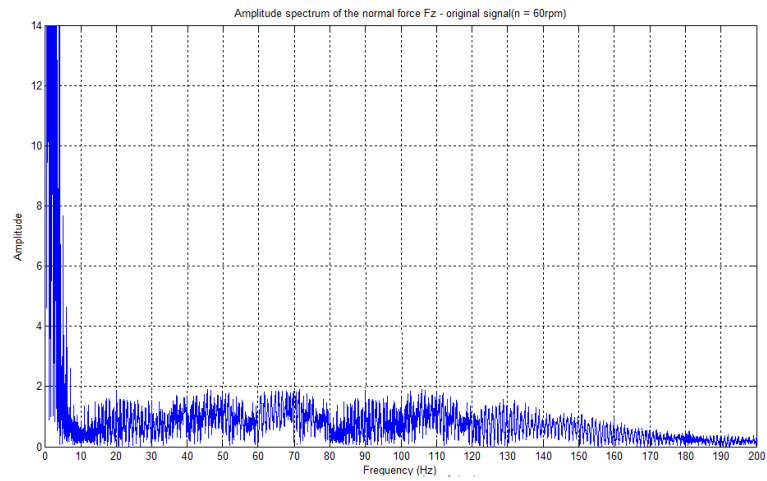


(b)

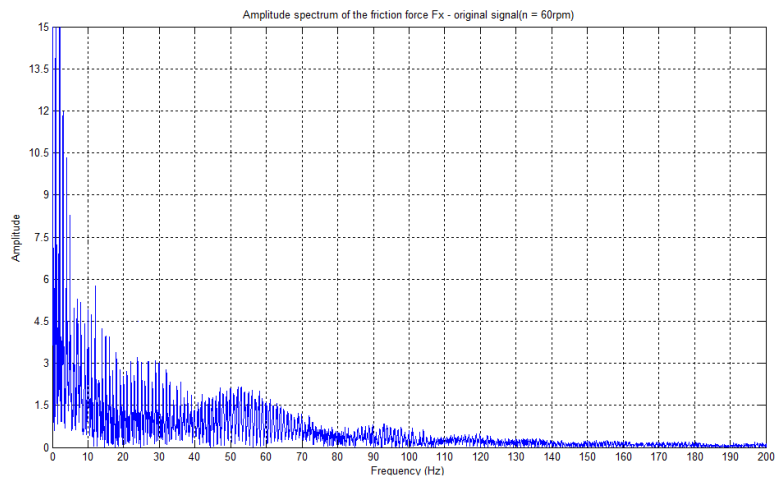


(c)

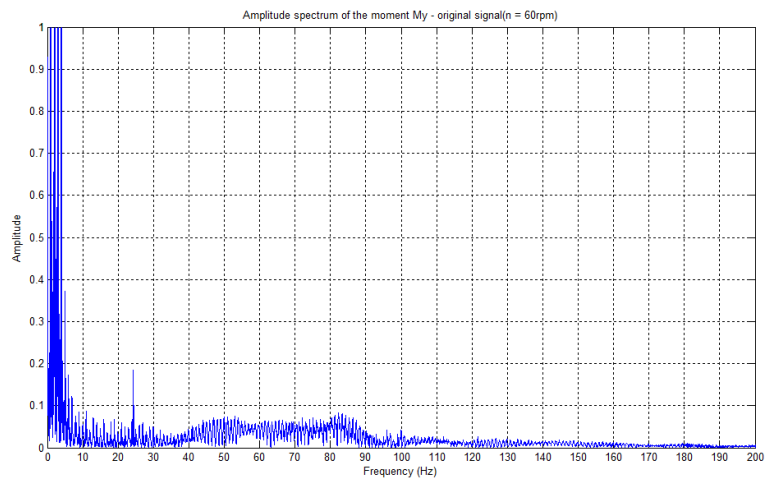
Figura B.2: Dati delle forze durante la sola fase di movimento della camma: forza normale  $F_z$  (a), forza d'attrito  $F_x$  (b), momento  $M_y$  (c) .



(a)

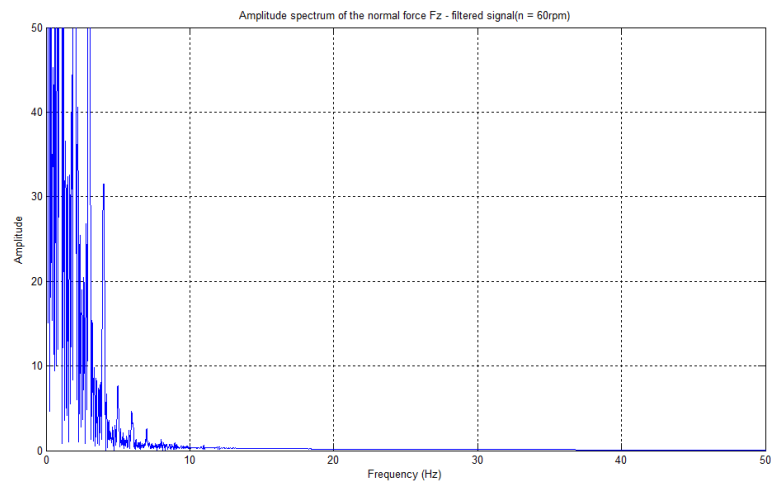


(b)

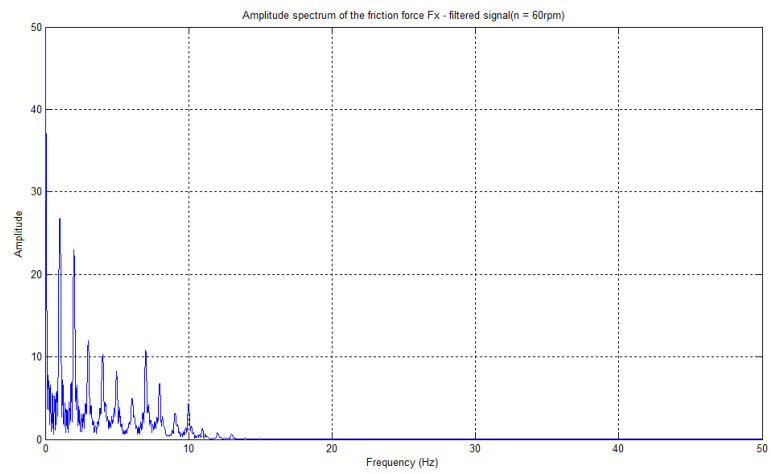


(c)

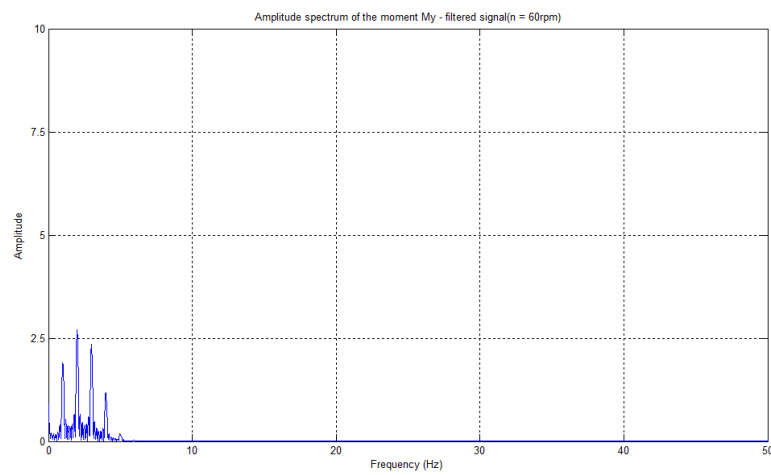
Figura B.3: Andamenti degli spettri di ampiezza: forza normale  $F_z$  (a), forza d'attrito  $F_x$  (b), momento  $M_y$  (c), precedentemente al filtraggio.



(a)



(b)



(c)

Figura B.4: Andamenti degli spettri di ampiezza: forza normale  $F_z$  (a), forza d'attrito  $F_x$  (b), momento  $M_y$  (c), successivamente al filtraggio.



## Appendice C

# Data-sheet della telecamera

Vengono di seguito riportati i data-sheet della telecamera, ottenuti dal sito della ditta costruttrice.

### technical data

	unit	setpoint	pco.1200 hs
resolution (hor x ver) <sup>1</sup>	pixel		1280 x 1024
pixel size (hor x ver)	µm <sup>2</sup>		12.0 x 12.0
sensor format / diagonal	mm <sup>2</sup> / mm		15.36 x 12.29 / 19.67
peak quantum efficiency	%	@ 520 nm typical	27
full well capacity	e <sup>-</sup>		63 000
image sensor			MT9 M413
dynamic range	dB	@ CMOS camera	59.6
dynamic range A/D <sup>2</sup>	bit		10
readout noise	e <sup>-</sup> rms	@ 66 MHz	85
imaging frequency, frame rate	fps	@ full frame @ ROI VGA	636 1357
pixel scan rate	MHz	dual speed	66 / 86
A/D conversion factor	e <sup>-</sup> / count	normal	55
spectral range	nm		290..1100
exposure time	s		1 µs..5 s (50 ns..5 s opt.)
anti-blooming factor		typical	no blooming
smear	%		no smear
binning horizontal	pixel		1
binning vertical	pixel		1
dark current	e <sup>-</sup> / pixel-s	@ 25 C typical	5900
region of interest	pixel	horizontal vertical	steps of 10 steps of 1
interframing time (PIV mode)	ns	@ FWHM <sup>3</sup> and 100% fullwell signal	70

#### technical data

non linearity	%	full temperature range	< 2
uniformity darkness DSNU <sup>4</sup>	e <sup>-</sup> rms	@ 90% center zone	< 700
uniformity brightness PRNU <sup>5</sup>	%	typical	0.6
trigger, auxiliary signals		internal external	software TTL level
power consumption	W	typical maximum	25 40
power supply	VAC		90...260 (12 VDC optional)
mechanical dimensions camera (w x h x l)	mm <sup>3</sup>		84 x 66 x 175
mechanical dimensions power supply (w x h x l)	mm <sup>3</sup>		135 x 51 x 195
weight	kg		1
operating temperature range	°C		+5...+40
operating humidity range	%		10..90
storage temperature range	°C		-20...+70
optical input			Nikon f-mount, c-mount
data interface			IEEE 1394, camera link
CE certified			yes

software	Camware software for camera control, image acquisition and archiving of images in various file formats (WindowsXP and later) 32 / 64 bit–dynamic link library (DLL) is available for user customisation and integration on PC platforms (software development kit – SDK), software is operational in either single mode or with built-in recorder functions, drivers for popular third party software packages are available (see website)
options	CMOS image sensor in color version custom-made versions camRAM available in: 2 GB and 4 GB

frame rate table [frames per second]

pixelclock exposure time	66 MHz 1/fps / <1/fps	86 MHz 1/fps / <1/fps
1280 x 1024 pixel (full frame)	488 / 486	636 / 634
1280 x 512 pixel	977 / 969	1272 / 1263
1280 x 256 pixel	1953 / 1923	2545 / 2506
1280 x 128 pixel	3906 / 3788	5090 / 4936
1280 x 64 pixel	7813 / 7353	10180 / 9581
1280 x 32 pixel	15625 / 13889	20360 / 18098
1280 x 16 pixel	31250 / 25000	40720 / 32576

# Bibliografia

- [1] E. Ciulli, M. Carli, K. Stadler, M. Lorenzetti, Evoluzione di un'attrezzatura sperimentale per prove in condizioni di transitorio, DIMNP 014(05), 2005.
- [2] D. Vela, E. Ciulli, F. Fazzolari, Dynamic aspects of a new experimental apparatus for tribological investigations on cam-follower pairs, 13th world congress in mechanism and machine science, IFTOMM 2011, Guanajuato, Mexico, 2011.
- [3] E. Ciulli, F. Fazzolari, B. Piccigallo, Experimental study on circular eccentric cam-follower pairs, 2014.
- [4] F. Fazzolari, E. Ciulli, D. Vela, F. Antonelli, G. Moretti, E. Peroni, Taratura di un dinamometro a sei assi per la misura della forza di contatto fra camma e piattello, DIMNP 002 (2011), 2011.
- [5] D. Vela, E. Ciulli, F. Fazzolari, A novel instrumentation for contact force measurement in cam-follower pairs, Proceedings of the 18th International Colloquium Tribology, Industrial and Automotive Lubrication, 2012, Esslingen, Germany, 10 p., Technische Akademie Esslingen, ISBN 3-924813-97-3.
- [6] D. Vela, E. Ciulli, B. Piccigallo, F. Fazzolari, Investigation on cam-follower lubricated contacts, Proc. IMechE, Part J: J. Engineering Tribology, 2011, 225(J6), 379-392.
- [7] R. Bassani, E. Ciulli, K. Stadler, M. Carli, Lubricated non-conformal contacts under steady-state and transient conditions, AIMETA, 2005.
- [8] E. Ciulli, M. Lorenzetti, R. Squarcini, Determinazione dell'indice di rifrazione di un lubrificante mediante analisi di immagini interferometriche, DIMNP 013(2003), 2003.
- [9] E. Ciulli, T. Draexl, K. Stadler, Film thickness analysis for EHL contacts under steady-state and transient conditions by automatic digital image processing, Advances in tribology, Vol. 2008, Article ID 25187, 16 pages, 2008, doi:10.1155/2008/25187, [http://www. Hindawi.com/journals/at/volume-2008/](http://www.Hindawi.com/journals/at/volume-2008/), ISSN: 1687-5915, e-ISSN: 1687-5923, doi:10.1155/AT(2008) .
- [10] E. Ciulli, T. Draexl, K. Stadler, An automated digital image processing for film thickness measurements of EHL point contacts using white light interferometry, DIMNP 003(2007), 2007.
- [11] T. Peynot, Digital image processing: colour image processing, third edition.

- [12] M. Eguchi, T. Yamamoto, Film thickness measurement using white light spacer interferometry and its calibration by HSV color space, in proceedings of the 5th international conference on tribology (AITC-AIT '06), Parma, Italy, 2006.
- [13] J. Molimard, M. Querry, P. Vergne, I. Krupka, M. Hartl, R. Poliscuk, M. Liska, - Differential Colorimetry: A tool for the analysis of fluid film lubrication, *Mecanique e Industries* 3 (2002), pp. 571-581,2002.
- [14] I. Krupka, M. Hartl, V. Fuis , M. Liska, Experimental study of lubricant film thickness behavior in the vicinity of real asperities passing through ILubricated Contact, *Society of Tribologists and lubrication Engineers, Tribology Transactions*, 47:376-385, 2004, ISSN: 0569-8197 print / 1547-397X.
- [15] D. C. Ghiglia, L. A. Romero,Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods, *Journal of the optical society of America A*, vol.11, no.1, pp.107-117,1994.
- [16] E. Ciulli, Surface deformations in a sphere-plane contact,1999.
- [17] K.L. Johnson, *Contact Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge, 1985
- [18] B.N. Norden, On the compression of a cylinder in contact with a plane surface, *Institute For Basic Standards, National Bureau of Standards, Washington D.C* 20234, 1973.
- [19] E.Ciulli, F. Fazzolari, L. A. Ferreira, J. A. R. Seabra,Cam and Follower Contact and Lubrication Using a New Experimental Apparatus,Master's Degree Dissertation presented to the Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.
- [20] E.Ciulli, M. Beghini, D. Vela, F. Fazzolari, Progetto di una attrezzatura sperimentale per lo studio del contatto camma-piattello, Pisa, 2005.
- [21] E.Ciulli, F. Fazzolari, A.Paglini,Attrezzatura camma-piattello: allestimento,sviluppo di procedure di elaborazione dati ed analisi dei risultati delle prime prove sperimentali, Dipartimento di ingegneria civile e industriale, Pisa 2013.
- [22] O. Marklund, Interferometric measurements and analysis with applications in elastohydrodynamic experiments, Doctoral thesis, Lulea university of technology, Department of Computer Science and Electrical Engineering Division of Industria Electronics, 1998:29, ISSN: 1402-1544, ISRN: LTU-DT-98/29-SE.
- [23] O. Marklund, L. Gustafsson, Correction for pressure dependence of the refractive index in measurements of lubricant film thickness with image analysis, Division of Industrial Electronics, Lulea University of Technology, Sweden.